SEPTIEMBRE 2010

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MATERIALES
Física exótica del grafeno

MEDICINA
Mejora de las vacunas de ADN

PSICOLOGIA
La inteligencia de los bebés

EVOLUCION
Nuevo origen de las aves modernas

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

¿PIERDE ENERGIA EL UNIVERSO?



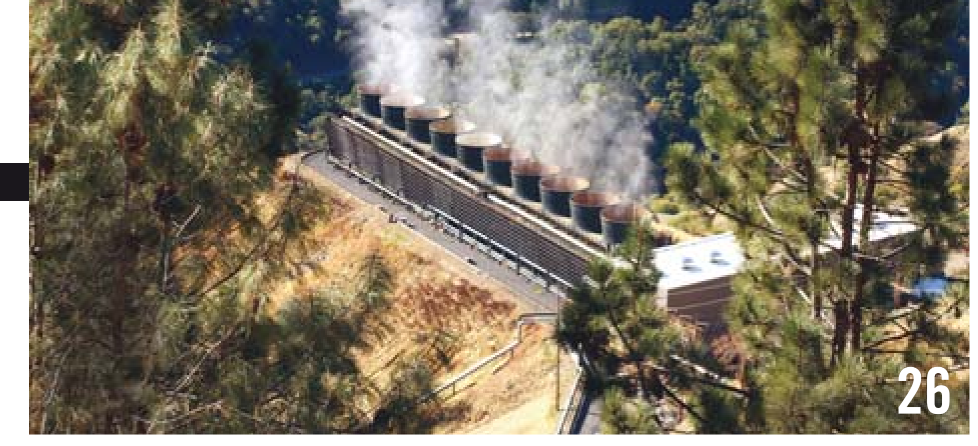
La luz parece violar la ley de la conservación de la energía



9 770210 136004 00408

SUMARIO

Septiembre de 2010/ Número 408



Los últimos avances en geotermia permiten nuevas fuentes de energía limpia.



Los tratamientos basados en ADN suministran un gen para curar una dolencia.



El éxito de las primeras aves modernas tal vez residiera en su menor especialización evolutiva.

ARTICULOS

COSMOLOGIA

12 ¿Pierde energía el universo?

Tamara M. Davis

La energía total se conserva. Cualquier estudiante de física conoce esta ley. No obstante, existe un problema: no puede aplicarse al universo en su conjunto.

MEDICINA

20 Fármacos basados en ADN

Matthew P. Morrow y David B. Weiner

Tras años de intentos fallidos, una nueva generación de vacunas y medicamentos contra el VIH, la gripe y otras enfermedades persistentes son ahora objeto de ensayos clínicos.

NUEVAS ENERGIAS

26 Energía limpia a partir de aguas residuales

Jane Braxton Little

Dos ciudades de California tratan sus aguas residuales y las bombean al subsuelo para producir electricidad.

EVOLUCION

36 Origen de las aves modernas

Gareth Dyke

Se pensaba que las aves modernas se habían originado tras la extinción de los dinosaurios. Ahora sabemos que vivieron junto a ellos.

MATERIALES

42 Electrónica del grafeno

José González Carmona, M.ª Angeles Hernández Vozmediano y Francisco Guinea

El grafeno, una lámina de carbono cuyo espesor puede ser de un solo átomo, muestra propiedades electrónicas exóticas que revisten un gran interés para la investigación fundamental y el desarrollo de nuevos materiales.

BIOLOGIA DEL DESARROLLO

50 Desarrollo embrionario y evolución

Katherine E. Willmore

Un amplio espectro de factores, genéticos y físicos, de localización y cronológicos, impone límites a los rasgos de un animal o amplifica los cambios



A escalas cosmológicas, la energía no admite una definición libre de ambigüedades.



Ensayo, error e hipótesis en la mente del bebé.



La agricultura vertical en las ciudades evitaría el transporte de alimentos a grandes distancias.

PSICOLOGIA

58 Así piensan los bebés

Alison Gopnik

Los niños, incluso los más pequeños, saben, experimentan y aprenden mucho más de lo que se creía.

ASTRONOMIA

64 La selenografía en los siglos XIX y XX

Manfred Gottwald

Desde la invención de la fotografía hasta el comienzo de la exploración local.

SOSTENIBILIDAD

74 Agricultura vertical

Dickson Despommier

El cultivo en rascacielos urbanos consumiría menos agua y combustibles que la agricultura a cielo abierto, paliaría la degradación de las tierras y nos proveería de alimentos frescos.

FILOSOFIA DE LA CIENCIA

82 ¿Es la teoría de cuerdas una ciencia?

Dieter Lüst

Los críticos la acusan de hacer afirmaciones que escapan a toda verificación empírica. Puede que la teoría de cuerdas obligue a un cambio paulatino de paradigmas en la física.

SECCIONES

3 HACE...

4 APUNTES

6 CIENCIA Y SOCIEDAD

32 DE CERCA
A plena luz,
por *Carles Carboneras*

34 DESARROLLO SOSTENIBLE
Cómo paliar el déficit presupuestario,
por *Jeffrey D. Sachs*

35 CIENCIA Y GASTRONOMIA
Merengues, cristales de aire,
por *Hervé This*

88 CURIOSIDADES DE LA FISICA
Así se reparten los átomos el espacio, por *Norbert Treitz*

92 JUEGOS MATEMATICOS
Releyendo a Borges,
por *Gabriel Uzquiano*

94 LIBROS

INVESTIGACION
Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Florek

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Yago Ascasibar: *¿Pierde energía el universo?*; Juan Manuel González Mañas: *Fármacos basados en ADN*; Joandomènec Ros: *Origen de las aves modernas*; Alejandra Delprat: *Desarrollo embrionario y evolución*; Luis Bou: *Así piensan los bebés* y *Agricultura vertical*; Teodoro Vives: *La selenografía en los siglos XIX y XX*; Raquel Santamarta: *¿Es la teoría de cuerdas una ciencia?*; J. Vilardell: *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes y Ciencia y sociedad*; Mª Rosa Zapatero Osorio: *Apuntes*; Carlos Lorenzo: *Ciencia y sociedad*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Mª Rosa Vallés: *Ciencia y gastronomía*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Mark Hooper

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euros	120,00 euros
Resto del mundo	100,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Evolución humana. «El *Homo sapiens* es el resultado de la mutación, la recombinación y la selección natural. Sus antecesores ya habían desarrollado las habilidades para usar y fabricar herramientas, así como la capacidad para la transmisión cultural. Pero el siguiente paso evolutivo fue de tal magnitud que supuso una diferencia fundamental con respecto a los precedentes. Había aparecido un organismo cuyo dominio de la tecnología y de la comunicación simbólica le permitió crear una cultura supraorgánica. Otros organismos se adaptan al entorno a través de cambios en sus genes, los cuales obedecen a las exigencias del ambiente circundante. El hombre, y sólo el hombre, puede también transformar el entorno para que sea éste el que se adapte a sus genes. Sus genes le permiten inventar utensilios nuevos, cambiar de opinión, propósitos y conducta, adquirir nuevos conocimientos y desarrollar el saber. —Theodosius Dobzhansky»

...cien años

La enfermedad del sueño. «Con anterioridad a los años noventa, en Uganda se desconocía la enfermedad del sueño. Su introducción se atribuye a Emin Pasha [Eduard Schnitzer] y los 10.000 seguidores que fueron trasladados desde los límites del territorio del Congo, foco de la enfermedad. Se planteó la cuestión de cómo se propagaba el parásito. Se sabía que la mosca tse-tse era la responsable de la terrible peste bovina entre el ganado sudafricano, por lo que se sospechaba de un insecto chupador que azotaba las orillas del lago. Se trata de un miembro de la especie tse-tse conocido como *Glossina palpalis*, al que las autoridades nativas llaman *kivu*. Se comparó un mapa de los lugares donde proliferaban las moscas tse-tse con otro en el que se señalaban las zonas de enfermedad del sueño: ambos territorios coincidían.»

FUENTE DE SABER o, cuando menos, de higiene. 1910.

Una fuente. «Ha sido objeto de invención una fuente de agua potable sanitaria para su uso en escuelas y otros lugares públicos. Tal y como muestra la ilustración, un conjunto de tubos, que pueden curvarse como se desee a efectos ornamentales, se disponen de manera que conduzcan el agua a un mismo punto. El impacto del agua en ese lugar da origen a un chorro a modo de pequeño géiser al que el bebedor puede aplicar la boca. Al tiempo, el agua no aprovechada cae hacia la base de la fuente.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIII, Nº. 13; 24 DE SEPTIEMBRE DE 1910

...ciento cincuenta años

Pesca con veneno. «Acaba de publicarse (en Inglaterra) un documento sobre la caza de ballenas mediante el uso de veneno. El agente en cuestión es el cianuro de hidrógeno, también llamado ácido prúsico. Este sutil veneno fue introducido, en cantidades de unas dos onzas [sesenta centímetros cúbicos], en tubos de vidrio sujetos al arpón. Los señores W. y G. Young enviaron varios de esos arpones a uno de sus barcos que faenaban en Groenlandia. Al topar con una ballena de buen tamaño, uno de ellos fue lanzado con destreza y se incrustó profundamente en el cuerpo del animal. El leviatán se hundió perpendicularmente hacia abajo. Al poco tiempo, la cuerda se aflojó y la ballena apareció muerta en la superficie. La tripulación quedó tan horrorizada ante el tremendo efecto del arpón envenenado que se negó a volver a emplear otro.»

Combustión interna. «Un parisino, de nombre Etienne Lenoir, está causando sensación entre sus compatriotas mediante la exhibición de un motor calórico. Su pequeño taller, en una callejuela, se ve asediado a diario por una multitud de curiosos de todas las clases sociales. Según *Cosmos* y otros periódicos franceses, la era del vapor ha terminado; Watt y Fulton no tardarán en ser olvidados. Así es como se hacen estas cosas en Francia. El de Lenoir es un motor de explosión. En el cilindro, una chispa eléctrica inflama una mezcla de aire e hidrógeno o gas de alumbrado, lo que consigue que el pistón se mueva en vaivén. Desde el punto de vista práctico, se objeta a estos motores las fuertes sacudidas mecánicas y la acumulación de calor. La gasolina, aunque mucho más costosa (como combustible) que el carbón, es tan limpia y manejable que algún día empezará a emplearse en la multitud de pequeños motores que accionarán las máquinas de coser y otros aparatos ligeros.»

[NOTA: El motor de Lenoir está considerado como el primer motor de combustión interna comercialmente viable.]

Fábrica de gas. «Una dama que viajaba en un ómnibus de Washington, al divisar la gran cúpula inacabada del Capitolio (que, por ahora, no se asemeja demasiado a una cúpula) dijo inocentemente: “Supongo que ésa es la fábrica de gas, ¿verdad?”. “Sí, señora, para la *nación*”, fue la respuesta de otro pasajero.»

Errata corrige

En el artículo “Ciegos con visión” del mes de julio, pág. 37, en la oración “En la visión ciega de las emociones expresadas por otra persona interviene también el CS, así como ciertas regiones del mesencéfalo, como la amígdala”, el término “amígdala” debe sustituirse por “sustancia gris periacueductal”.
En el artículo “Botox falsificado, una amenaza real” del mes de agosto, pág.74, donde figura “una unidad de NTB equivale a 4,8 nanogramos”, debe sustituirse “una unidad” por “100 unidades”.

ASTEROIDES

Un pasado problemático

Los asteroides corresponden a restos de la formación planetaria. Su historia completa es, sin embargo, mucho más compleja y apenas revelada. Lo que los expertos denominan asteroides es tan variopinto —desde cantos rodados y montones de grava flotante a miniplanetas con signos de una actividad volcánica anterior e incluso agua líquida— que no pueden tener un mismo origen.

Sólo los de mayor tamaño (más de 100 kilómetros de diámetro) datan de los albores del sistema solar, hace 4,6 mil millones de años. Entonces, nuestro sistema no era más que un enjambre de asteroides o "planetesimales". Cómo se ha llegado a este punto es un misterio, pero la idea dominante es la del polvo primordial girando en torno a un Sol naciente que coaguló en cuerpos cada vez mayores. Algunos de esos cuerpos se juntaron para formar los planetas; otros, acelerados por la gravedad de los más voluminosos, fueron lanzados al espacio profundo; y otros cayeron hacia el Sol; y unos pocos no hicieron nada de lo anterior. Esos supervivientes subsisten en puntos donde los planetas los han dejado solos, sobre todo en el hueco entre las órbitas de Marte y Júpiter. Poco a poco, también ellos son eliminados. Sobreviven menos de uno de cada 1000 o quizá menos de unos pocos de cada millón de asteroides originales que poblaron el cinturón.



Los asteroides diminutos no son reliquias sino escombros. Se muestran con una gran variedad de tamaños, lo que apunta a que se producen en las colisiones en cadena; los asteroides se golpean y se destrozan sucesivamente. Algunos son rocas, otros metales; se sugiere que proceden de capas distintas de los cuerpos originales. Una tercera parte de los asteroides pertenece a familias con órbitas parecidas, que trazadas hacia atrás en el tiempo señalan un único punto del espacio, la localización de una colisión que los vio nacer. Puesto que las familias deberían dispersarse transcurridos de 10 a 100 millones de años, la formación de asteroides por colisión debe seguir siendo vigente.

Sin duda, también lo es la formación planetaria. Siempre que un asteroide golpea un planeta, ayuda a construirlo. Los asteroides son, por tanto, los restos de la formación planetaria y, a su vez, los toques finales del proceso.

—George Musser

PHOTO RESEARCHERS, INC. (*asteroides*); JEFF SCHMALTZ/NASA, *MODIS RAPID RESPONSE TEAM* (*imagen satélite*)

CLIMA

Inviernos más fríos en Europa

El Sol no radia siempre con la misma intensidad. Se suceden fases de mayor y menor actividad en ciclos de unos once años. Una manifestación visible de tales cambios la proporcionan las manchas solares: si bien en ellas la temperatura es localmente menor de lo habitual, un gran número de manchas indica un intenso campo magnético y, como consecuencia, una mayor emisión global de radiación. Las últimas mediciones del campo magnético del Sol parecen indicar que, en estos momentos, nuestro astro se halla menos activo que en los últimos 90 años.

Sami Solanki, del Instituto Max Planck para el Sistema Solar de Lindau, y colaboradores británicos han hallado una interesante correlación entre los registros meteorológicos de los últimos 350 años y la actividad magnética del Sol durante ese tiempo: el descenso de la actividad solar se acompaña de inviernos más crudos en Centroeuropa y las Islas Británicas. De hecho, ahora mismo podríamos haber entrado en una de esas fases de inviernos gélidos, circunstancia que explicaría los rigores del invierno pasado.

El fenómeno no guarda ninguna conexión con el cambio climático. Prueba de ello es que la relación entre la actividad solar y el clima europeo sólo se hizo patente una vez sustraídos los efectos acumulados del calentamiento global. Por otro lado, los cambios parecen afectar de manera exclusiva a Centroeuropa. Es probable que una menor actividad solar dificulte la llegada de los vientos cálidos del Atlántico. Sin embargo, la razón para ello aún se desconoce.

—Spektrum der Wissenschaft



GRAN BRETAÑA completamente cubierta de nieve el 7 de enero de 2010. Tales escenas podrían repetirse con frecuencia en los próximos años.

OCEANOS

Gigantes microscópicos

En lugar de las enormes ballenas y los legendarios cefalópodos, los verdaderos mastodontes marinos podrían ser los poderosos microorganismos. Constituyen al menos la mitad y puede que hasta el 90 por ciento de la biomasa oceánica, según los datos recogidos durante una década por el proyecto Censo de la Vida Marina.

La secuenciación masiva automática del ADN sugiere que los géneros de microorganismos podrían ser hasta cien veces más numerosos de lo que se creía. El aumento del número de géneros y especies también hace que crezca la estimación del número de individuos. Se pensaba que un litro de agua de mar contenía unos 100.000 microorganismos, pero el número real superaría los mil millones.

Estas minúsculas criaturas se unen para crear algunas de las mayores masas vivas del planeta. Junto a la costa del Pacífico de Sudamérica se ha hallado un manto de suelo marino del tamaño de Grecia.

A pesar de su reducido tamaño individual, los microorganismos desempeñan una función vital en el clima del planeta. Ayudan a convertir el dióxido de carbono atmosférico en carbono utilizable y también oxigenan los sedimentos y reciclan los nutrientes en el océano. Poco se sabe, sin embargo, sobre la sensibilidad de estas criaturas a las consecuencias previstas del cambio climático, como los cambios de temperatura, de los gases disueltos en el agua y de la acidez.

—*Katherine Harmon*



ABUNDANCIA OCEANICA: Este microorganismo, *Culexiregiloricus tricchisccalida*, fue descubierto en el fondo marino, junto a la costa africana, por el proyecto Censo de la Vida Marina.

BIOFISICA

El secreto de la lengua de los camaleones

Cuando bajan las temperaturas, los animales de sangre fría se hacen más lentos. Ello debería ser una buena noticia para sus presas. Sin embargo, el vistoso camaleón, que puede desplegar su lengua hasta alcanzar dos veces la longitud de su cuerpo en 0,07 segundos, no pierde mucha velocidad en el despliegue de su arma.

Christopher Anderson y Stephen Deban, de la Universidad del Sur de Florida, han estudiado este fenómeno en camaleones del Yemen. Han descubierto que, si las temperaturas bajan 10 grados centígrados, los lanzamientos de la lengua se ralentizan sólo entre un 10 y un 19 por ciento. El secreto reside en el tejido de colágeno de la lengua, que se desenrolla por el impulso almacenado, no por la actividad muscular. En cambio, en las mismas condiciones de baja temperatura, el movimiento de la lengua de los ectodermos, que utilizan únicamente un sistema basado en los músculos, se reduce en un 42 por ciento.

Con todo, los camaleones no son tan rápidos en recoger la presa. La velocidad de recogida de la lengua, que depende de la contracción muscular, se reduce entre un 42 y un 63 por ciento. Teniendo en cuenta que algunos camaleones habitan en lugares donde las temperaturas descienden por debajo del punto de congelación, estos hallazgos, que se publicaron en línea el 8 de marzo en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, explican el modo en que estos reptiles mantienen su amplio nicho trófico.

—*Catherine Harmon*



PSICOLOGIA

La empatía, más femenina

Cuando nos hallamos bajo presión, luchamos o huimos. O al menos eso han dicho los científicos durante mucho tiempo. Esta respuesta, sin embargo, podría ser propia sólo de los varones. Nuevos datos demuestran que, a diferencia de los hombres, las mujeres bajo presión cuidan de los otros e inician amistades, dedicándose a entablar y mantener relaciones sociales.

En la reunión anual de 2010 de la Sociedad estadounidense de Neurología Cognitiva, en Montreal, Mara Mather, de la Universidad del Sur de California, y sus colaboradores pidieron a voluntarios de ambos sexos que colocaran su mano en agua helada, acción que dispara los niveles de cortisona, la hormona del estrés. Después, mientras se les realizaba un escáner cerebral, tenían que observar rostros enfadados o neutrales.

Los varones mostraban un menor grado de actividad que los hombres sin estrés en una región del cerebro clave para el procesamiento de los rostros; ello sugiere que su capacidad de evaluar las expresiones faciales había disminuido. En contraste, dicha región presentaba un mayor grado de actividad en las mujeres estresadas. Además, estas mujeres mostraban un mayor grado de actividad en el circuito cerebral que permite que las personas comprendan las emociones de los demás. La mayor capacidad de las mujeres estresadas para interpretar el rostro de otras personas e identificarse con ellas podría ser una causa subyacente de la tendencia a estrechar lazos en circunstancias difíciles, que podría haber evolucionado como una forma de proteger a su descendencia.

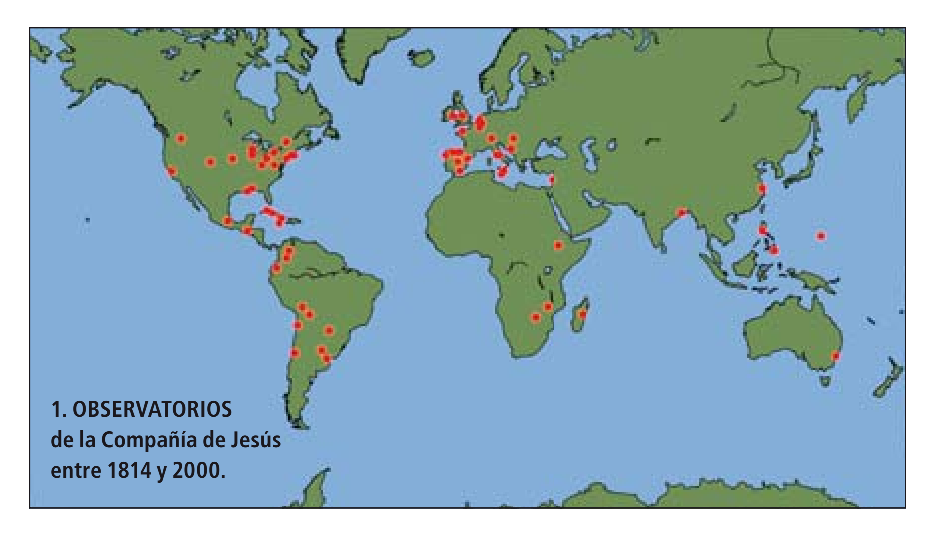
—*Ingrid Wickelgren*

CORTESIA DE GUNNAR GAD/MARCO BUNTZOW/GERMAN CENTER FOR MARINE BIODIVERSITY RESEARCH/CENSUS OF MARINE LIFE *(microorganismo)*; STEPHEN DALTON *Photo Researchers, Inc. (camaleón)*; DAVID LEAHY *Getty Images (mujer)*

Los jesuitas y la geofísica

Durante siglos, los jesuitas han desarrollado una intensa labor científica en el campo de la sismología y el magnetismo terrestre

En la dedicación de los jesuitas a la ciencia destaca su contribución a la geofísica y dentro de ella a la sismología y el magnetismo terrestre. Esta contribución puede dividirse en dos períodos. El primero, entre los siglos XVI y XVIII, se concreta en los estudios sobre terremotos y sus daños (en especial los sucedidos en las nuevas tierras de América), especulaciones sobre sus orígenes, medidas del campo magnético terrestre y elucubraciones sobre la naturaleza del mismo. El segundo período, que comienza en los albores del siglo XIX, se caracteriza por la fundación de observatorios astronómicos y geofísicos en los que destacan sus secciones de sismología y magnetismo.



1. OBSERVATORIOS de la Compañía de Jesús entre 1814 y 2000.

En la primera época destaca la figura de Athanasius Kircher (1601-1680), profesor de matemáticas del Collegio Romano y escritor polifacético. Escribió obras sobre magnetismo, óptica y música, y propuso una concepción sobre el interior de la Tierra y su relación con terremotos y volcanes muy influyente en su época.

Fueron publicados por jesuitas varios trabajos relacionados con el gran terremoto de Lisboa del 1 de noviembre de 1755; por botón de muestra los realizados en Praga por el director del observatorio, Joseph Stepling (1716-1778). Las primeras referencias a terremotos de América del Sur aparecen en la obra de José de Acosta (1540-1600), en la que se describen los efectos del terremoto de Chile de 1575, de dos terremotos en Perú (Arequipa en 1582 y Lima en 1586) y en Quito en 1586. Juan Conzález Chaparro (1581-1651) describió detalladamente el terremoto que destruyó Santiago de Chile el 13 de mayo de 1647.



2. JAMES B. MACELWANE (1883-1956), director del departamento de geofísica de la Universidad de Saint Louis.

Entre los primeros estudios de jesuitas sobre el magnetismo terrestre destaca el de José de Acosta, que describe la variación de la declinación magnética a través del océano Atlántico y los puntos donde la declinación es nula, uno de ellos cerca de las islas Azores. El primer jesuita en publicar una obra completa sobre el magnetismo fue Nicolò Cabbeo (1586-1650), en 1629, en la que recogía lo que se conocía entonces sobre el tema junto con sus propias observaciones y experimentos; por primera vez, relacionó la atracción magnética con la eléctrica. En 1769, Maximilian Hell (1720-1792), director del Observatorio de Viena, realizó un conjunto de observaciones de la declinación magnética durante su viaje a Laponia, a lo largo de la costa de Noruega.

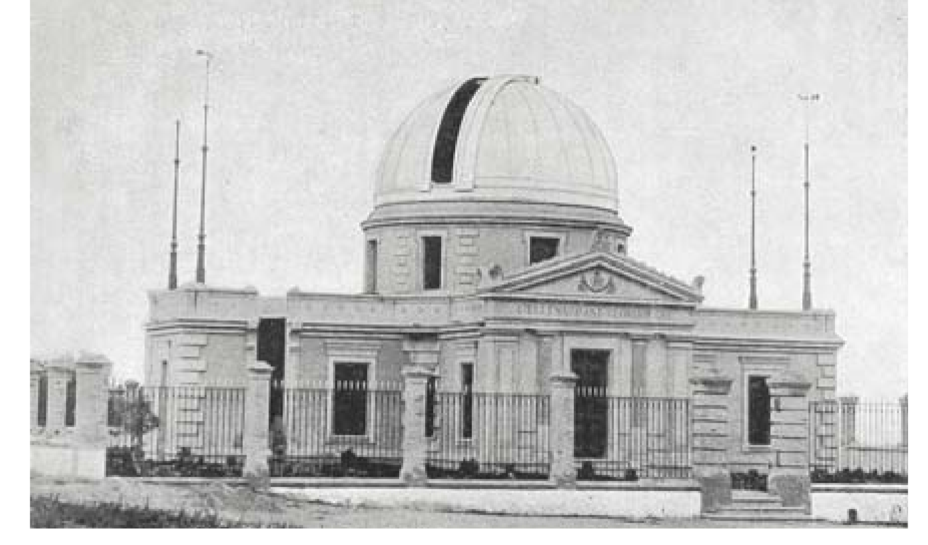
La Compañía de Jesús fue suprimida por la Santa Sede en 1773 y restaurada en 1814. Con la apertura de nuevos colegios y universidades, la tradición científica jesuita fue establecida de nuevo. Pero la situación histórica era distinta. En este segundo período, la participación de los jesuitas en la geofísica se hizo con un esfuerzo más serio e institucional. A partir de mediados del siglo XIX, los jesuitas instalaron 77 observatorios geofísicos y astronómicos por todo el mundo: 26 en Europa, 6 en Asia, 5 en Africa, 1 en Australia, 21 en Norteamérica y 18 en Sudamérica y Centroamérica. La mayor parte de estos observatorios fueron creados antes de 1910; muchos cesaron sus operaciones en los años sesenta y setenta del siglo XX.

Dos observatorios fueron instalados en España: el Observatorio de Cartuja en Granada (1902), dedicado a astronomía y sismología, y el Observatorio del Ebro en Tarragona (1904), para el estudio de la relación entre la actividad solar y el campo magnético. Gran interés revisten los observatorios instalados en tierras de misión de Africa y Asia. En numerosos casos, fueron los primeros observatorios geofísicos instalados en aquellos países. En entre ellos destacan el Observatorio de Manila (1865), el de Zikawei en Shanghai (1872), el de Tananarive en Madagascar (1889), el de Ksara en el Líbano (1907) y el de Addis-Abeba en Etiopía (1957). En Australia los jesuitas instalaron un observatorio

en Riverview, Nueva Gales del Sur, en 1907.

En América Central y del Sur los terremotos de gran intensidad son un acontecimiento común, con un riesgo muy alto de víctimas y daños. De ahí que los observatorios instalados allí destacaran sobre todo en sismología. La primera estación sismográfica se instaló en Puebla, México, en 1877. En 1913 se instaló una estación sismológica en La Paz, Bolivia, que se convirtió pronto en un importante centro sismológico. En Bogotá se fundó, en 1941, el Instituto Geofísico de los Andes Colombianos; durante un tiempo fue uno de los mejores institutos de investigación sismológica en América del Sur.

La historia del trabajo de los jesuitas en sismología en los EE.UU. está unida a la Asociación Sismológica Jesuita (JSA, por sus siglas en inglés), inaugurada en 1909. Estaba formada por dieciséis estaciones, quince en universidades estadounidenses y una en Canadá, todas equipadas con la misma instrumentación. Fue la primera red sismológica continental. En 1925, las estaciones fueron reorganizadas con la Estación Central establecida ahora en la Universidad de Saint Louis, que asumió también la responsabilidad de analizar los datos y de localizar epicentros de terremotos, publicarlos y distribuirlos a la comunidad sismológica mundial. La Estación Central siguió ofreciendo este servicio hasta principios de los años sesenta del siglo pasado. En el presente, sólo Saint Louis y Weston funcionan como institutos de investigación sismológica.



3. OBSERVATORIO de Cartuja, Granada.

Stephen J. Perry (1833-1889), director del Observatorio del Colegio Stonyhurst (Gran Bretaña) entre 1868 y 1889, es la figura más relevante de los jesuitas en el campo del magnetismo terrestre. Dedicó su mayor esfuerzo al estudio de la relación entre las variaciones del campo magnético terrestre y la actividad solar, tema entonces muy controvertido y por el que fue elegido miembro de la Regia Sociedad de Londres.

El sismólogo jesuita más renombrado fue sin la duda James B. Macelwane (1883-1956), de la Universidad de Saint Louis, reorganizador de la JSA. Entre sus estudios se encuentran los de la propagación de las ondas sísmicas, la constitución del interior de la Tierra, y la naturaleza de los microsismos y su relación con las tormentas atmosféricas. En 1962, la Unión Geofísica Americana creó una medalla en su honor para el reconocimiento de la contribución a las ciencias geofísicas de un científico joven.

Entre los jesuitas geofísicos españoles destacan Luis Rodés (1881-1939) y Antonio Romañá (1900-1981), directores del Observatorio del Ebro, con sus estudios sobre la influencia de varias formas de actividad solar en los campos magnético y eléctrico de la Tierra. También M. Sánchez Navarro-Neumann (1867-1941), director del Observatorio de Cartuja; compuso el primer catálogo de terremotos moderno de España y publicó numerosos estudios sobre sismicidad y el primer libro de sismología en español.

Agustín Udías
Catedrático emérito de geofísica
Universidad Complutense de Madrid

El espectro del fondo cósmico de microondas

Posibilidades para extraer más información de la radiación de fondo

Los cosmólogos hablan muy a menudo sobre el fondo cósmico de microondas, una "fotografía" del universo a la tierna edad de 380.000 años. De hecho, se recurre tanto a la radiación de fondo que quizá parezca que debería estar agotada como fuente de información. La Agencia Espacial Europea tiene la intención de que Planck, su nuevo satélite, extraiga "toda la información esencial disponible" del patrón de la radiación. Sin embargo, los expertos que analizan las expectativas futuras afirman que la radiación de fondo posee un aspecto apenas explorado que, si pudiera observarse con la precisión adecuada, revelaría nuevos detalles sobre el universo primitivo: su espectro.

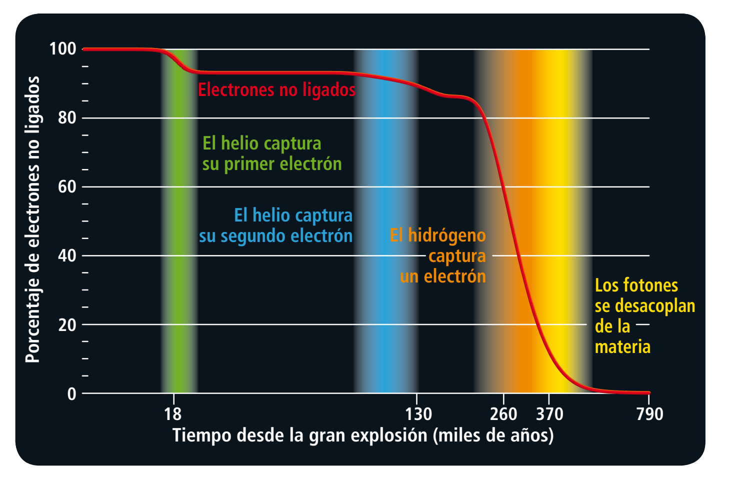
El análisis del espectro de frecuencias (colores) emitidos por el Sol y otros astros constituye un recurso habitual para determinar la composición y propiedades de los mismos. A lo largo de los últimos dos años, una serie de trabajos realizados por Rashid Sunayev, del Instituto de Astrofísica Max Planck de Garching, Jens Chluba, del Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica y José Alberto Rubiño Martín, del Instituto de Astrofísica de Canarias, entre otros, exploran la posibilidad de que un sucesor del satélite Planck logre recoger huellas similares en la radiación del fondo cósmico, cuyo espectro se nos presenta en la actualidad completamente anodino y genérico.

De acuerdo con el punto de vista tradicional, la radiación del fondo cósmico se compone de los fotones liberados unos 380.000 años tras la gran explosión. En un primer momento, el universo era una "sopa" muy caliente de electrones, protones y fotones que interactuaban unos con otros. A medida que el universo fue expandiéndose, su tem-

peratura disminuyó lo suficiente como para permitir que los protones se uniesen a los electrones para formar átomos de hidrógeno, un proceso conocido con el nombre de "recombinación". Al ser eléctricamente neutros, los átomos dejaron de dispersar los fotones (los fotones interactúan sólo con partículas dotadas de carga eléctrica). Así, tras la recombinación, los fotones comenzaron a fluir libremente por el espacio. A día de hoy, dichos fotones son los que componen el fondo cósmico de microondas. El espectro de esta radiación se corresponde, con excelente aproximación, con el espectro de un cuerpo negro a la temperatura de 2,73 kelvin.

Sin embargo, la explicación anterior pasa por alto los detalles del proceso de recombinación. En primer lugar, los protones tardaron cierto tiempo en capturar a los electrones. Cuando un electrón y un protón se unen para dar lugar a un átomo de hidrógeno, liberan energía en forma de fotones (ya que la energía del átomo ligado es menor que la de un protón y un electrón libres). Pero un fotón emitido por un átomo recién creado podía impactar con otro átomo vecino y hacer que éste perdiese su electrón. Lo que finalmente provocó que se superase esta fase de antagonismo mutuo fue la expansión del universo, la cual fue agotando la energía de los fotones y estabilizó el proceso de formación de átomos. El referido horizonte temporal de 380.000 años es sólo un hito aproximado empleado por razones prácticas.

Un segundo detalle consiste en que, aunque el universo se hallaba compuesto en su mayor parte de hidrógeno, también contenía algo de helio. Los núcleos de helio, con el doble de carga eléctrica, ejercían una mayor atracción sobre los electrones y formaron átomos antes que el hidrógeno. En promedio, capturaron su primer electrón en torno a los 18.000 años después de la gran explosión y su segundo electrón cuando el universo contaba con unos 100.000 años de edad. Al contrario de lo ocurrido en el caso del hidrógeno, el proceso de síntesis de helio transcurrió de manera mucho más rápida: una fracción de átomos de hidrógeno ya presentes en aquel tiempo interceptó gran parte de los fotones emitidos por el helio e impidió, por tanto, que dichos fotones interfiriesen en la creación de más átomos de helio.



Los átomos se formaron en distintas etapas a medida que el universo se enfriaba y permitía que los núcleos capturasen electrones. Durante este proceso se emitieron fotones que los observatorios del futuro quizá detecten. Ello nos ayudaría a entender el universo primitivo.

Los fotones emitidos por el hidrógeno y el helio dejaron su impronta en la sopa primigenia. Medir el número de fotones emitidos por el helio nos permitiría saber exactamente cuánto helio sintetizó el universo, una cantidad que actualmente debe ser extrapolada (con dificultad) a partir de la cantidad de helio presente en las estrellas. "Se trataría de una forma muy clara de determinar la abundancia primordial del helio", afirma Sunyaev. Además, los fotones emitidos por el helio proceden de una época anterior a la emisión del fondo cósmico de microondas, por lo que nos ofrecerían indicios de procesos aún más antiguos y hasta ahora ocultos, como la desintegración de partículas exóticas.

El problema reside en que los fotones de la recombinación superan a los fotones emitidos por el helio en una proporción de uno a mil millones. Por fortuna, debido a que los átomos de helio se formaron con tanta rapidez, los fotones emitidos deberían estar concentrados en torno a bandas de frecuencias muy estrechas (las líneas espectrales correspondientes). Sunyaev y Chluba han solicitado una nueva misión que barra el espectro de frecuencias y busque un pico en el número de fotones. "Para encontrar esas líneas hay que observar una posición fija y barrer las distintas frecuencias", afirma Rubiño Martín. En cambio, las misiones existentes, como el satélite Planck, observan en una frecuencia fija y proceden a un barrido espacial.

Durante años, las mediciones del fondo cósmico de microondas exhibieron una distribución espacial totalmente uniforme, hasta que llegó el día en que lograron medirse sus anisotropías (fluctuaciones espaciales). Hoy, las mediciones espectrales parecen no variar. Si se detectasen esas fluctuaciones espectrales, tendríamos acceso a otra avalancha de información sobre los orígenes del universo.

George Musser

Una fotografía cósmica desenfocada

Hasta ahora, las investigaciones sobre el fondo cósmico de microondas venían desechando los detalles del proceso de formación de hidrógeno y helio. Las técnicas de observación eran demasiado imprecisas para detectar sus efectos. Sin embargo, las mejoras en los instrumentos de medida obligan a los físicos teóricos a adaptarse.

Mientras duró la recombinación del hidrógeno, los fotones siguieron dispersando partículas con carga y "perdieron la huella" de las estructuras de materia a pequeña escala. De no haber tenido en cuenta este proceso, se habría deducido que dichas estructuras no se encontraban presentes durante las primeras etapas del universo y se habrían ajustado los modelos teóricos para eliminarlas. Ello hubiera modificado las estimaciones de parámetros fundamentales como la densidad de materia. "Sería triste preparar un experimento muy sensible y emplear un modelo teórico erróneo", afirma Eric Switzer, cosmólogo de la Universidad de Chicago.

SCIENTIFIC AMERICAN. FUENTE: JENS CHLUBA (*Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica*), RASHID SUNYAEV (*Instituto de Astrofísica Max Planck, Garching*) Y JOSE ALBERTO RUBIÑO MARTIN (*Instituto de Astrofísica de Canarias*)

Nuestra herencia neandertal

Los análisis genéticos indican que hubo hibridación entre los neandertales y los humanos actuales

El cuatro por ciento del ADN de los humanos actuales que no viven en Africa procede de los neandertales, como consecuencia del entrecruzamiento entre los neandertales y los primeros humanos anatómicamente modernos. A esa conclusión ha llegado el equipo liderado por Svante Pääbo del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, en Leipzig, que ha confeccionado el primer borrador del genoma neandertal. El borrador representa alrededor del 60 por ciento del total del genoma; para ello se ha empleado el ADN de tres fósiles de neandertal de 38.000 años de antigüedad hallados en la cueva de Vindija, en Croacia.

Las pruebas que indican la contribución de los neandertales al ADN de los humanos actuales han sorprendido a los científicos, quienes publicaron sus resultados en *Science* el pasado 7 de mayo. "Inicialmente pensé que podía tratarse de una casualidad estadística", afirma Pääbo. Ese hallazgo contrasta claramente con sus estudios anteriores. En 1997, su equipo publicó la primera secuencia completa del ADN mitocondrial de los neandertales. Las mitocondrias son los orgánulos que generan la energía de la célula; poseen su propia secuencia de ADN, distinta de la del ADN del núcleo celular, mucho más larga. Su análisis concluía que los neandertales no habían contribuido a la formación del ADN mitocondrial de los humanos actuales. Pero como el ADN mitocondrial representa una minúscula proporción de la información genética de un individuo, cabía la posibilidad de que el ADN nuclear de los neandertales ofreciese una historia diferente. De hecho, la mayoría de los estudios genéticos habían llevado a los investigadores a situar el origen de los *Homo sapiens* en Africa. Los datos indicaban que, durante su expansión hacia otros continentes, la nueva especie sustituyó a otros humanos arcaicos sin mezclarse genéticamente con ellos. Esa explicación se conoce como modelo "fuera de Africa" o modelo de reemplazamiento.

Pero ahora se ha demostrado que en realidad sí se hibridaron. Cuando Pääbo y su equipo analizaron los patrones de la variación genética del ADN nuclear de los humanos actuales, identificaron 12 regiones del genoma donde las poblaciones no africanas exhibían variantes inexistentes en los africanos. Se podía suponer entonces que esas regiones procedían de los neandertales, ya que estos habitaron en Eurasia pero no en Africa. Al comparar esas regiones con la secuencia recientemente reconstruida de los neandertales, descubrieron 10 coincidencias. Lo que significa que 10 de las 12 variantes halladas en los humanos no africanos proceden de los neandertales. Sin embargo, esas regiones genéticas no parecen codificar ningún rasgo relevante desde un punto de vista funcional.

Curiosamente, los investigadores no observaron un mayor parecido con los europeos actuales, como cabría esperar dado que los neandertales sobrevivieron en Europa hasta hace tan sólo 28.000 años. La semejanza de la secuencia neandertal respecto a la de poblaciones actuales alejadas entre sí, como las de Francia, Papua Nueva Guinea y China, era equiparable. Para explicar este hecho, los investigadores sugieren que la hibridación se produjo en el Próximo Oriente hace entre 50.000 y 80.000 años, antes de que los *Homo sapiens* poblasen otras partes del Viejo Mundo y de separarse en diferentes grupos.

Algunos paleoantropólogos no se han sorprendido de estos hallazgos. Desde hacía tiempo defendían, basándose en el registro fósil, que otros humanos arcaicos, como los neandertales en Eurasia o los *Homo erectus* de Asia oriental, se habían hibridado con los primeros *Homo sapiens* y, por tanto, debían considerarse antepasados nuestros. Se trata de la hipótesis del modelo multirregional del origen de *Homo sapiens*. Estos científicos han recibido con satisfacción la noticia de la identificación de ADN neandertal en las poblaciones actuales: "Es una prueba importante de la evolución multirregional", afirma el autor principal del modelo Milford H. Wolpoff, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor.

Christopher B. Stringer, del Museo de Historia Natural de Londres y defen-

¿AMIGOS Y AMANTES? El análisis del ADN demuestra que los primeros seres humanos anatómicamente modernos se hibridaron con los neandertales. Algunos científicos opinan que también pudieron haberse entrecruzado con otros humanos arcaicos, como el *Homo erectus*.





E. R. DEGGINGER *Photo Researchers, Inc.*

sor de la hipótesis "*fuera de Africa*", reconoció que los datos genéticos demuestran que "muchos de los que no somos africanos poseemos una herencia neandertal". Pero Stringer mantiene que el origen de nuestra especie se explica en su mayor parte con el modelo de reemplazamiento. Laurent Excoffier, especialista en genética de poblaciones de la Universidad de Berna, apoya esta afirmación y destaca la ausencia de hibridación cuando los humanos modernos se desplazaron a Europa: "en todos los fenómenos de especiación existe un período en el que dos especies divergentes todavía pueden reproducirse entre sí".

Además de arrojar luz sobre la interacción entre los primeros humanos, el genoma neandertal está ayudando a localizar las partes del genoma humano actual que nos diferencian del resto de las especies. Hasta el momento, el equipo de Pääbo ha identificado algunas regiones del genoma humano que contienen variaciones no observadas en los neandertales y que pudieron haber contribuido a nuestra evolución. Algunas de esas regiones guardan relación con el desarrollo cognitivo, el movimiento de los espermatozoides y la fisiología de la piel. Pero queda por determinar con exactitud el efecto de estas pequeñas diferencias en la secuencia humana actual sobre la función de esas regiones del genoma. Pääbo concluye que "éste es sólo el principio de la exploración de la unicidad humana".

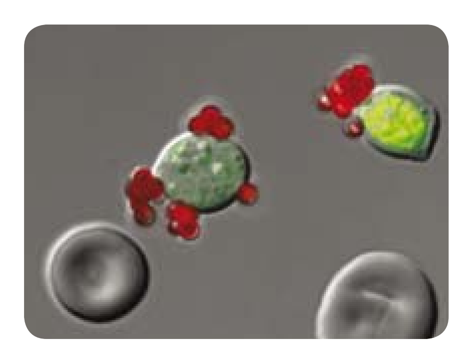
Kate Wong

Trampas magnéticas para gérmenes

Partículas magnéticas que atrapan a los gérmenes y se extraen luego de la sangre podrían aplicarse al tratamiento de enfermedades infecciosas

Utilizar un campo magnético para extraer —literalmente— las enfermedades del torrente sanguíneo parece un sueño de ciencia ficción. Sin embargo, podrían haber encontrado una forma de conseguirlo, al menos en relación con la septicemia, una infección de la sangre potencialmente letal que resulta en el colapso de varios órganos.

Donald E. Ingber, biólogo de la facultad de medicina de Harvard, junto con Chong Wing Yung y otros colaboradores, ha hallado una forma de filtrar los agentes patógenos de la sangre de pacientes con septicemia mediante partículas magnéticas de sólo algunas micras de tamaño. En el modelo que han desarrollado, las partículas, cubiertas por un anticuerpo que se une a los hongos o a las bacterias causantes de la septicemia, se mezclan con la sangre extraída de un paciente. Una vez se han unido a los agentes patógenos, los imanes se trasladan, mediante un campo magnético, a una solución salina que fluye junto a la sangre y los arrastra. En pruebas realizadas con muestras de entre diez y veinte mililitros de sangre, se eliminó un 80 por ciento de los patógenos.



ADHESION: Las pequeñas partículas magnéticas (*rojo*) se hallan cubiertas de anticuerpos, lo cual les permite adherirse a los hongos (*verde*). También pueden verse glóbulos rojos.

Una de las claves del éxito del filtrado corresponde al tamaño de las partículas, cuyo diámetro es un octavo del de los glóbulos rojos. Son lo suficientemente pequeñas como para no alterar el flujo de la solución salina; la aparición de turbulencias haría que la solución se mezclase con la sangre y dificultaría la separación de los gérmenes.

Ingber piensa que una versión más avanzada de su sistema, que describió en el número del 7 de mayo de *Lab on a Chip*, resolvería uno de los problemas que afrontan las unidades de cuidados intensivos, que deben determinar si un caso de septicemia está causado por una bacteria o un hongo. Puesto que los antifúngicos son tóxicos, suele retrasarse su uso hasta que se diagnostica el tipo de patógeno. Este diagnóstico, sin embargo, lleva su tiempo, lo cual podría poner en peligro a un paciente cuyo estado se va deteriorando. Ingber espera poder incorporar distintos tipos de proteínas adhesivas en las partículas, para extraer diferentes tipos de microorganismos a la vez, sin necesidad de un diagnóstico.

También cree que no es necesario eliminar todos los gérmenes. "Lo que intentamos es establecer un punto en el que se rompa el equilibrio en favor del paciente", afirma, refiriéndose a la cantidad de patógenos en el organismo. Según su teoría, bastaría con reducir el número de bacterias u hongos para que los antibióticos o antifúngicos operasen con mayor eficacia.

"Es una teoría novedosa y muy elegante", comenta Tonse Raju, neonatólogo del Instituto Nacional Eunice Kennedy Shriver de Sanidad Infantil y Desarrollo Humano. Sin embargo, señala, la teoría entraña un problema notable: hasta la fecha, no se ha demostrado que la disminución del número de patógenos mejore la eficiencia de los medicamentos. Además, gran parte del daño que causa la septicemia proviene de la respuesta inflamatoria del propio cuerpo y no de los gérmenes. Otro problema, señala Raju, consiste en que algunos hongos y bacterias se esconden en bolsas de pus o en zonas con un nivel muy bajo de suministro sanguíneo, como la cavidad peritoneal, y, por tanto, eludirían la purificación realizada en la sangre.

Aun así, Ingber no se desanima. Ha iniciado ensayos preliminares en conejos, dado que su tamaño es similar al de los niños prematuros, que sufren una alta incidencia de sepsis. Ingber reconoce que hay obstáculos en su camino, pero espera que, con nuevos estudios, la eliminación magnética de enfermedades deje de ser una fantasía científica.

Kate Wilcox

CORTESIA DE CHONG WING YUNG, KIRSTEN JOHNSON Y DONALD E. INGBER *Harvard Medical School*



¿Pierde energía el universo?

La energía total se conserva. Cualquier estudiante de física conoce esta ley. No obstante, existe un problema: no puede aplicarse al universo en su conjunto • TAMARA M. DAVIS

"La energía ni se crea ni se destruye." La ley de conservación de la energía, una de nuestras más queridas leyes de la física, se halla presente en todas las facetas de la vida: el calor necesario para calentar una taza de café, la luz del Sol para las reacciones de fotosíntesis, los alimentos que necesitamos ingerir para que nuestro corazón siga latiendo... No podemos vivir sin comer y los coches no arrancan sin gasolina. Así las cosas, ¿qué ocurre cuando las observaciones parecen contradecir una de las ideas más profundamente arraigadas de la ciencia?

Abandonemos por un momento la Tierra y consideremos el universo en su conjunto. Casi toda la información que nos llega del espacio exterior lo hace en forma de luz. Según la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, la incesante expansión cósmica provoca que las ondas electromagnéticas se "desplacen hacia el rojo" (su longitud de onda aumenta) a medida que atraviesan el universo. Pero cuanto más larga es la longitud de onda de la luz, menor es su energía. ¿Adónde va esa energía, entonces? ¿Acaso se viola el principio de conservación?

La física moderna nos ha enseñado que, cuando exploramos los límites del espacio y del tiempo, muchos de los principios básicos extraídos de nuestra vida cotidiana se tambalean. Einstein nos mostró que la simultaneidad es una mera ilusión que depende de la perspectiva del observador y que las nociones de "distancia" o "duración" también son relativas. Además, hoy en día se piensa que la aparente continuidad del tiempo y del espacio quizá resulte tan ilusoria como la de la materia. Así pues, ¿en qué leyes de la física nos es dado confiar? ¿Cuáles de nuestros principios más arraigados podrían no ser sino una venda en los ojos que nos impide discernir verdades más profundas? La historia de la ciencia está plagada de cadáveres de ideas equivocadas. ¿Es la conservación de la energía una de ellas?

No lo es. Más adelante veremos que, al considerar los fotones uno a uno, la energía siempre se conserva, también cuando la luz se desplaza hacia el rojo. De igual modo, para los fenómenos que tienen lugar a escalas ga-

CONCEPTOS BASICOS

- A medida que el universo se expande, la luz emitida por galaxias distantes se desplaza hacia el rojo. La luz que nos llega tiene, por tanto, menos energía que la emitida.
- Esa aparente violación del principio de conservación de la energía no contradice las leyes físicas.
- De acuerdo con la autora, una correcta interpretación demuestra que la energía de los fotones individuales se conserva. Lo mismo ocurre con los procesos físicos a escalas galácticas.
- A escalas cosmológicas, sin embargo, el problema radica en que la energía en un espaciotiempo curvo no admite, en general, una definición libre de ambigüedades.

MARK HOOPER

POR QUE LA ENERGIA PARECE DESAPARECER

Quienes sostienen que el universo pierde energía basan en parte sus conclusiones en el desplazamiento hacia el rojo de la luz. El universo parece expandirse, como si el espacio mismo se estirase. Así, las ondas electromagnéticas también se estiran, desplazándose, en el caso de la luz visible, hacia la parte roja del espectro (*abajo*). Los fotones de mayor longitud de onda poseen una energía menor, por lo que a medida que viajan hacia nosotros, los fotones se vuelven menos energéticos.

¿Quiere decir eso que el universo pierde energía? La energía total de todos los fotones del universo no puede calcularse, pero en principio es posible calcular la energía contenida dentro de una membrana imaginaria que se expanda en armonía con el universo. A la derecha, la región interior de la membrana se representa en dos dimensiones. Los fotones pueden entrar y salir a través de ella, pero la homogeneidad del espacio asegura que, en promedio, el número de fotones en el interior se mantendrá constante. Dado que cada fotón pierde energía conforme el espacio se expande, el cálculo induce a pensar que la energía total de los fotones en esa región y, por tanto, en el resto del universo, debe disminuir.

LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS SE DILATAN…



…AUNQUE EL NUMERO DE FOTONES SE CONSERVA, LA ENERGIA PARECE HABER DESAPARECIDO

lácticas, las violaciones son prácticamente imposibles. Sin embargo, a escalas cosmológicas, el concepto de energía no resulta tan fácil de definir. Es precisamente ahí donde reside el interés del asunto.

Simetrías y leyes de conservación

La conservación de la energía no sólo ha sido verificada experimentalmente en numerosas ocasiones, sino que existen buenas razones de carácter teórico para creer en ella. Las mismas se las debemos a la matemática Emmy Noether, quien, hace unos cien años, demostró que las leyes de conservación se hallan relacionadas con las simetrías de la naturaleza.

Solemos concebir la simetría como algo relacionado con la imagen en un espejo, un reflejo de algún tipo o tal vez una rotación. Un triángulo equilátero es simétrico porque, si lo giramos 120 grados, obtenemos la misma figura. Un cuadrado también es simétrico, pero basta con rotarlo 90 grados para recuperar una configuración idéntica a la de partida. En dos dimensiones, la figura más simétrica posible es la circunferencia, ya que permanece inalterada para cualquier ángulo de rotación. En tales casos, nos hallamos ante una simetría continua.

Las leyes de la física también pueden ser simétricas. El paso del tiempo, por ejemplo, no altera las leyes de la naturaleza. Consideremos el caso de dos bolas de billar que chocan en un ángulo determinado y a cierta velocidad. Si se repite el experimento varias veces, el resultado es siempre el mismo. Esta

MOONRUNNER DESIGN

cualidad se conoce como simetría temporal. Las leyes de la naturaleza tampoco dependen del lugar en el que estemos (simetría espacial) ni de la dirección en la que miremos (simetría rotacional). Por supuesto, el paisaje puede cambiar dependiendo de dónde nos encontremos, en qué momento lo visitemos y hacia dónde estemos mirando. Pero las leyes de la física que dictan cómo ha de comportarse ese paisaje son independientes de la posición, el momento o la orientación. Cuando una ley permanece invariante de la manera descrita, se dice que, al igual que el círculo, posee una simetría continua.

El teorema de Noether demuestra que, cada vez que la naturaleza exhibe una simetría continua, aparece una ley de conservación asociada (y viceversa). En concreto, la simetría espacial implica la conservación del momento lineal; la simetría rotacional, la conservación del momento angular, y la simetría temporal, la conservación de la energía.

Por tanto, la afirmación de que la energía se conserva es tan rotunda como la de que las leyes de la física no cambian con el tiempo. Pero, por otro lado, si la simetría temporal se rompiese, la energía tampoco se conservaría. Como veremos más abajo, es justo en este punto donde la conservación de la energía se enfrenta a serias dificultades.

Expansión cósmica y efecto Doppler

No hay mejor manera de comparar el presente con el pasado que observar directamente el pasado a través de un telescopio. Dado que la luz tarda cierto tiempo en recorrer una distancia, al apuntar hacia un objeto situado, digamos, a mil años luz, lo que realmente estamos viendo es ese objeto tal y como era hace mil años. Hoy en día, la potencia de nuestros instrumentos nos permite remontarnos a la época en que se formaron las primeras galaxias e incluso más allá. La luz que llega hasta nosotros ha viajado durante miles de millones de años, y es su longitud de onda lo que nos permite evaluar el principio de conservación.

En los años veinte del siglo pasado, Edwin Hubble descubrió que la luz de las galaxias más lejanas se hallaba desplazada hacia el rojo: al llegar hasta nosotros, la longitud de onda de la luz emitida por los átomos de esas galaxias (como los de hidrógeno, por ejemplo) aparecía "estirada" con respecto a la longitud de onda emitida por el mismo tipo de átomos en un laboratorio. Dicho estiramiento era proporcional a la distancia a la que se encontraba la galaxia. De hecho, desde el descubrimiento de este fenómeno, cuando no resulta posible medir la distancia a una galaxia por otros métodos, se emplea el desplazamiento hacia el rojo para proporcionar una estimación.

El desplazamiento hacia el rojo (o hacia el azul) corresponde a un fenómeno cotidiano. Pensemos en un radar de carretera. A medida que nuestro automóvil se aproxima, nos parecerá que las ondas electromagnéticas emitidas por el radar —en caso de que pudiésemos verlas— llegan hasta nosotros ligeramente encogidas. Por el contrario, al dejar atrás el radar, las ondas se nos aparecerán estiradas. Se trata del efecto Doppler, el análogo electromagnético del familiar cambio de tono acústico cuando otro vehículo nos adelanta. Los radares de carretera miden la velocidad de nuestro automóvil a partir del desplazamiento Doppler de las ondas que rebotan en nuestro coche. Aunque en este caso las ondas no pertenecen al espectro visible, dichos estiramientos y contracciones de la longitud de onda siguen denominándose, respectivamente, "desplazamientos hacia el rojo" y "hacia el azul".

Sin embargo, el desplazamiento al rojo de origen cosmológico suele considerarse un fenómeno distinto del efecto Doppler tradicional. Este último lo provoca el movimiento relativo entre el emisor y el receptor. Los fotones no pierden o ganan energía, sólo les parecen distintos a uno y otro. Por el contrario, la mayoría de los libros de texto afirman que el desplazamiento al rojo cosmológico tiene lugar porque, a medida que la luz viaja, es el espacio mismo el que se expande, de modo análogo a como lo haría la superficie de un globo que se hincha.

De hecho, los desplazamientos al rojo cosmológicos existen incluso en ausencia de movimiento relativo. Para verlo, consideremos el siguiente experimento mental. Imaginemos una galaxia muy lejana y atada a la nuestra con una cadena irrompible. Dicha galaxia no se mueve con respecto a nosotros; pero, aun así, los cálculos indican que la luz que nos llegase desde la misma se hallaría desplazada hacia el rojo. Dicho resultado suele atribuirse a la expansión del espacio a través del que viaja la luz.

Movimientos peculiares

Así pues, los fotones que viajan a través de un universo en expansión parecen perder energía. ¿Ocurre lo mismo con la materia? Al describir el movimiento de la materia en el universo, se distinguen dos clases. Un objeto "en reposo" puede alejarse de nosotros sólo como consecuencia de la expansión cósmica, al igual que lo harían dos puntos pintados en un globo que se hincha. Estos objetos se denominan *comóviles*. Pero, superpuesto al movimiento

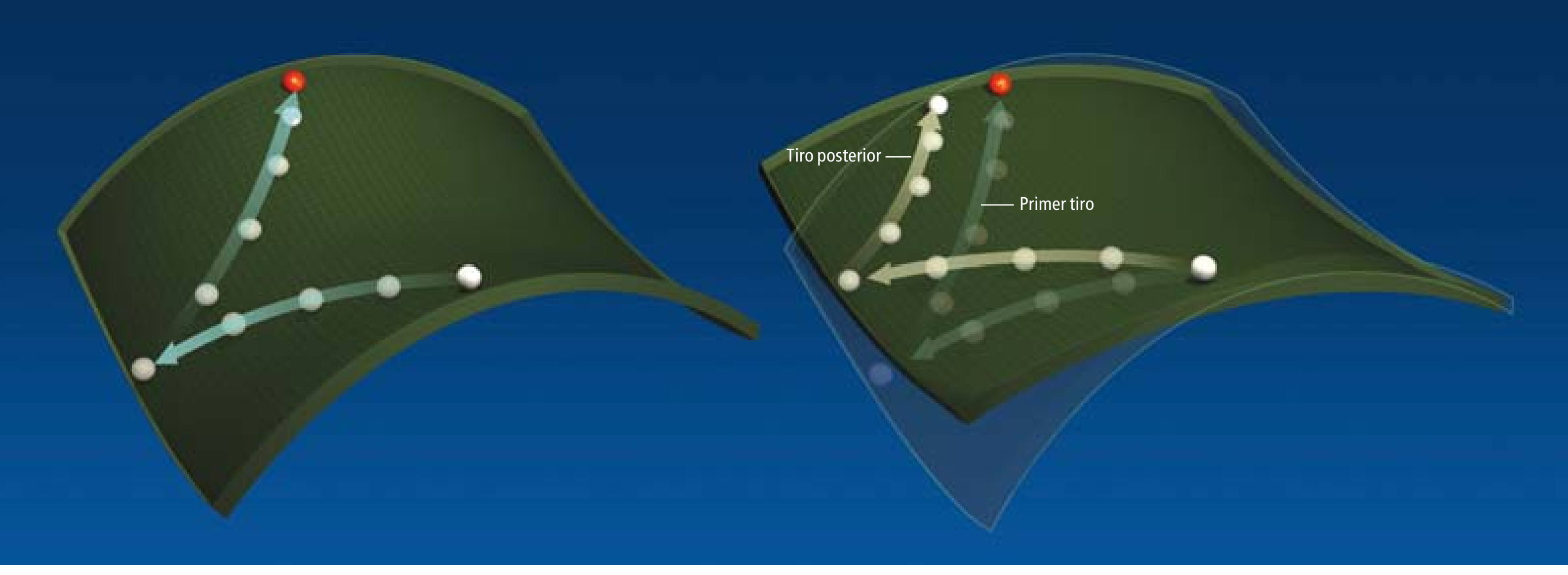
La metáfora del universo como un globo que se infla ha de interpretarse con cuidado

UN CAMBIO DE GEOMETRIA

Las leyes de conservación guardan una profunda conexión con las simetrías de la naturaleza. En concreto, la energía se conserva cuando las leyes de la física exhiben simetría temporal; es decir, cuando un mismo experimento arroja siempre idénticos resultados. Pero si, bajo las mismas condiciones, obtenemos resultados distintos a medida que el tiempo pasa, la energía no tiene por qué conservarse. Un ejemplo viene dado por una carambola en una mesa de billar cuya geometría cambia con el tiempo. A escala cosmológica, nuestro universo tiene una geometría variable, lo cual implica que la energía no tiene por qué conservarse.

MESA DE BILLAR CURVA
Para jugar en una mesa de billar con geometría curva (no euclídea) los tiros habrían de ajustarse a la geometría. Aparte de eso, si la geometría no cambia, un mismo tiro volverá a funcionar exactamente igual en el futuro. Debido a la simetría temporal, en un universo con geometría fija la energía ha de conservarse.

GEOMETRIA VARIABLE
En cambio, si la geometría de la mesa de billar se transforma con el tiempo, los tiros que funcionaron en el pasado no tienen por qué volver a funcionar la próxima vez. Ello implica una ruptura de la simetría temporal. Algo parecido puede ocurrir en el universo, ya que, de acuerdo con la relatividad general, el movimiento de la materia y la energía altera la geometría del espacio. En tales condiciones, la conservación de la energía no rige necesariamente.



MOONRUNNER DESIGN

de recesión (el que induce la expansión), un cuerpo también puede poseer un movimiento propio. Este último se conoce como "movimiento peculiar". Tiene lugar cuando un objeto se desvía del flujo de la expansión debido a efectos locales, como la atracción gravitatoria de una galaxia cercana o la propulsión en el caso de un cohete.

Todas las galaxias exhiben un movimiento peculiar. Pero, debido a la expansión cósmica, las galaxias muy distantes se alejan más rápido que las cercanas, por lo que su velocidad peculiar es pequeña comparada con su velocidad de recesión. A escalas muy grandes la distribución de las galaxias es aproximadamente uniforme, los efectos locales resultan insignificantes y las galaxias son, en esencia, comóviles. A todos los efectos, pueden considerarse como los puntos sobre la superficie de nuestro globo o como "hitos" colocados en un espacio en expansión.

Un sistema de referencia comóvil como el que definen las galaxias lejanas se muestra muy útil. Entre otras ventajas, proporciona un convenio universal de tiempo, ya que todos los observadores sitos en galaxias comóviles medirán el mismo intervalo de tiempo desde la gran explosión.

Si un viajero intergaláctico recorre miles de millones de años luz, pasará por delante de muchas "galaxias-hito". Pero, como consecuencia de la expansión del universo, esas galaxias se alejan constantemente unas de otras, por lo que a nuestro viajero le parecerá ir cada vez más despacio con respecto a cada nueva galaxia que deja atrás. En otras palabras, la velocidad del viajero disminuirá.

Del mismo modo que la luz pierde energía al incrementarse su longitud de onda, la materia también pierde energía al reducirse su velocidad. Ambos comportamientos quizá parezcan diferentes; sin embargo, resultan análogos desde un punto de vista cuántico. Según la descripción cuántica de la materia, las partículas también poseen propiedades ondulatorias. El físico Louis de Broglie descubrió que, cuanto mayor es el momento de una partícula, menor es su longitud de onda. Tal hallazgo le valió el premio Nobel en 1929.

La autora

Tamara Davis obtuvo el doctorado en la Universidad de Nueva Gales del Sur en 2004. Actualmente es investigadora de la Universidad de Queensland en Brisbane (Australia) y profesora de la Universidad de Copenhague. Su investigación se centra en la relación entre la cosmología y la física fundamental. Ha recibido el premio de la Sociedad Astronómica Australiana para investigadores jóvenes y el premio Mujer y Ciencia de L'Oréal-UNESCO en su edición australiana.

Las partículas de materia pueden poseer un alto valor del momento si su masa, su velocidad, o ambas son elevadas. Esta característica explica por qué una pelota de tenis no parece oscilar a modo de onda, ya que, en términos cuánticos, las pelotas de tenis poseen una masa enorme. A la velocidad típica en un partido profesional (unos 200 kilómetros por hora), la longitud de onda de la pelota resulta del orden de 10^{-34} metros, una cantidad del todo inapreciable. En cambio, a un electrón que viaja a la misma velocidad le corresponde una longitud de onda de 18 micrómetros. Pequeña, pero 29 órdenes de magnitud mayor que la de la pelota de tenis y, en cualquier caso, relevante para el comportamiento de un electrón.

Si calculamos la pérdida de velocidad relativa que experimenta una partícula con masa al ir dejando atrás a sus vecinos comóviles, obtenemos que la longitud de onda de De Broglie aumenta exactamente en la misma proporción que la longitud de onda de los fotones. Así, la luz y la materia se comportan de igual manera en lo que se refiere a las pérdidas de energía asociadas a la expansión del universo. En ambas situaciones parece violarse el principio de conservación. En el caso de la materia, la paradoja se explica debido al hecho de que estamos midiendo la velocidad en distintos sistemas de referencia (con respecto a cada una de las galaxias y en distintos momentos). Tal y como veremos a continuación, algo así ocurre con los fotones.

La energía total del universo

Para verificar si el universo pierde energía, podríamos pensar en calcular la energía total del universo. Empezaríamos por sumar la energía contenida en la masa de la materia (la masa m y la energía E son equivalentes en virtud de la ecuación $E = mc^2$, donde c representa la velocidad de la luz) y, después, añadiríamos la energía cinética asociada a los movimientos peculiares. A esa suma tendríamos que agregar la energía de la luz, así como acometer la difícil tarea de contabilizar la energía de todos los campos gravitatorios alrededor de los planetas, estrellas y galaxias, además de la energía de los enlaces químicos y los núcleos atómicos.

Sin embargo, toparíamos con un primer problema: quizás el universo sea infinito y, por tanto, contenga una cantidad infinita de materia y energía. A fin de superar semejante dificultad, podríamos considerar una membrana imaginaria alrededor de cierta región del universo y sumar la energía contenida en su interior. Dicha membrana se expandiría en sincronía con el universo, de modo que las galaxias comóviles permanecerían en el interior de la región considerada. Tanto la luz como la materia podrían entrar y salir de dicha región. Pero, dado que el universo es homogéneo, es de esperar que tales flujos de energía se compensarían mutuamente y que, en promedio, el contenido neto en el interior de la membrana se mantendría constante. El universo quedaría dividido en tales volúmenes, por lo que, para que la energía total se conservara, bastaría con que lo hiciera en el interior de cada uno de ellos.

El cálculo no es muy difícil para la materia comóvil. Su única energía proviene de su masa y, dado que en promedio no entra ni sale materia de la membrana, esa masa se conserva. Pero las cosas se complican al considerar el caso de la luz o el de la materia con velocidades peculiares. Aunque el número de fotones y partículas de materia dentro de la membrana no varíe, la energía de los fotones y la energía cinética asociada a los movimientos peculiares sí decrecen con el tiempo. De esta forma, la energía total dentro de la membrana disminuye.

La situación se tornaría aún más compleja si hubiéramos de tomar en cuenta la energía oscura, la responsable de que la expansión del universo se esté acelerando [*véase* "Cuestiones fundamentales de cosmología", por P. Schneider; Investigación y Ciencia, junio de 2010]. Si bien la naturaleza y propiedades de la energía oscura siguen siendo un misterio, parece que la energía oscura no se diluye conforme el universo se expande. Así, al aumentar el volumen de la membrana, crecería la cantidad de energía oscura encerrada, a pesar de que esa energía adicional no parece salir de ninguna parte. Podríamos pensar que tal incremento de energía oscura quizá compense las pérdidas de las otras formas de energía, pero no es así. Aunque tengamos en cuenta la energía oscura, la energía total dentro de la membrana no se conserva.

¿Cómo pueden reconciliarse una energía variable con el teorema de Noether? En realidad, no hay ninguna razón por la que el teorema de Noether haya de aplicarse a un universo en constante cambio. De acuerdo con la relatividad general, la materia y la energía curvan el espacio, y los cambios en la distribución de materia y energía deforman la geometría del mismo. En la vida cotidiana, dichos efectos son tan diminutos que resulta imposible detectarlos. Pero, a escalas cósmicas, desempeñan una función clave.

Esa maleabilidad del espacio implica que el comportamiento del universo no es simétrico en el tiempo. Para verlo, consideremos nuestro ejemplo inicial de las bolas de billar. Si

MAS ROMPECABEZAS COSMICOS

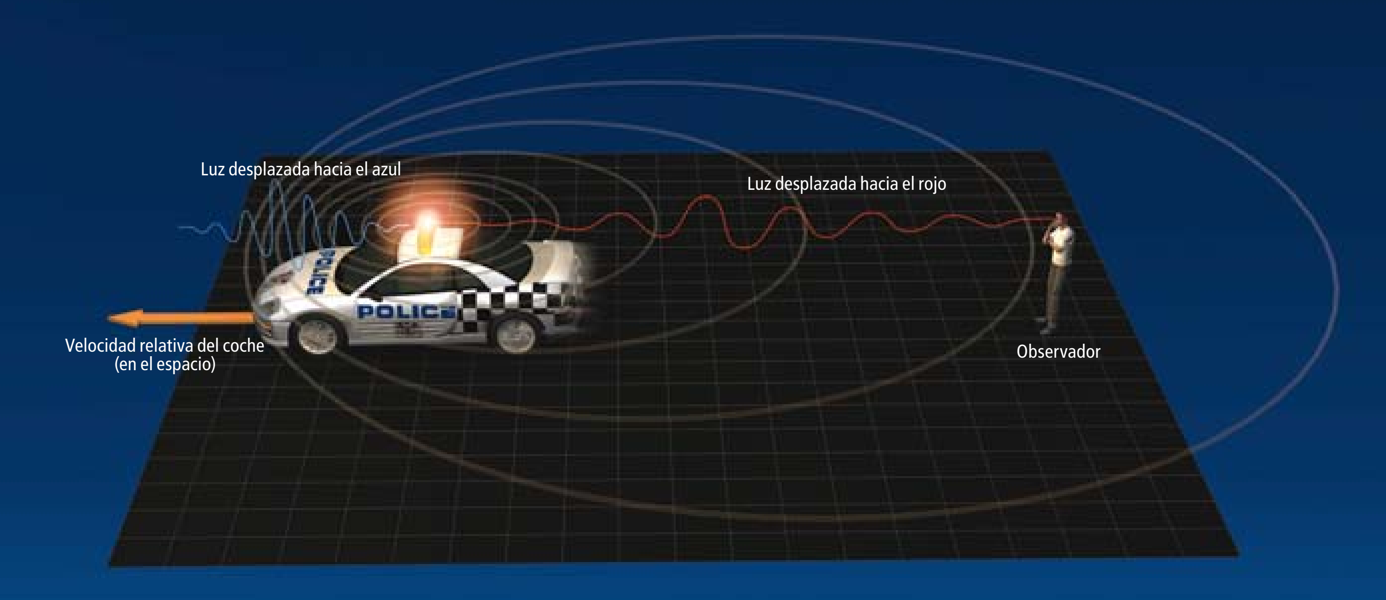
¿Afecta la expansión del universo al interior de nuestra galaxia?
No. Una vez que los efectos gravitatorios locales hacen que una galaxia se forme, la expansión no tiene la magnitud suficiente para separarla.

¿Acaso no se debe el desplazamiento hacia el rojo a una disminución de la densidad del universo? Los fotones también experimentan un desplazamiento hacia el rojo cuando remontan un gradiente de potencial gravitatorio.
Cierto. Pero, en cada instante, el universo es homogéneo, por lo que los fotones no han de remontar ningún gradiente de potencial en ningún momento.

¿Son los aumentos de entropía compatibles con la simetría temporal?
Sí. En las interacciones complejas entre partículas (tales como cascar un huevo) podemos deducir en qué sentido "se proyecta la película": viene dado por el aumento de entropía, equivalente a un aumento del desorden. Sin embargo, en lo que atañe a las leyes de la física, cada una de las interacciones entre partículas podría tener lugar, de igual manera, hacia delante o hacia atrás.

COMO SE CONSERVA LA ENERGIA DE UN FOTON

El desplazamiento hacia el rojo cosmológico suele atribuirse al estiramiento del espacio. Pero también puede interpretarse como un efecto del alejamiento de las galaxias con respecto al observador. En tal caso, sería similar al efecto Doppler que experimenta el sonido de la sirena de un coche de policía que nos adelanta. Un efecto análogo opera sobre la longitud de onda de los fotones emitidos por una fuente móvil. En el caso del coche de policía, la energía se conserva. De igual modo, al interpretar el desplazamiento hacia el rojo de una galaxia como consecuencia de un efecto Doppler, se comprueba que los fotones emitidos por la galaxia tampoco pierden energía.



EFECTO DOPPLER ORDINARIO

Los desplazamientos Doppler tienen su origen en el movimiento relativo. Las luces de un coche de policía aparecen desplazadas hacia el rojo o hacia el azul (si bien en una cantidad imperceptible para el ojo humano) según el coche se esté alejando o acercando, respectivamente. Cuanto mayor sea la velocidad del vehículo con respecto al observador, mayor será el efecto. Pero el fenómeno del desplazamiento Doppler no significa que los fotones cambien de color ni que pierdan energía por el camino: sólo quiere decir que su color depende del sistema de referencia.

observamos varias filmaciones de una misma carambola, pero ejecutada sobre una mesa cuya geometría cambia con el tiempo (una mesa plana que se va deformando paulatinamente), cada jugada será distinta de las restantes. Resultará posible deducir cuándo y en qué orden fueron rodadas cada una de las secuencias, ya que la simetría temporal se habrá roto.

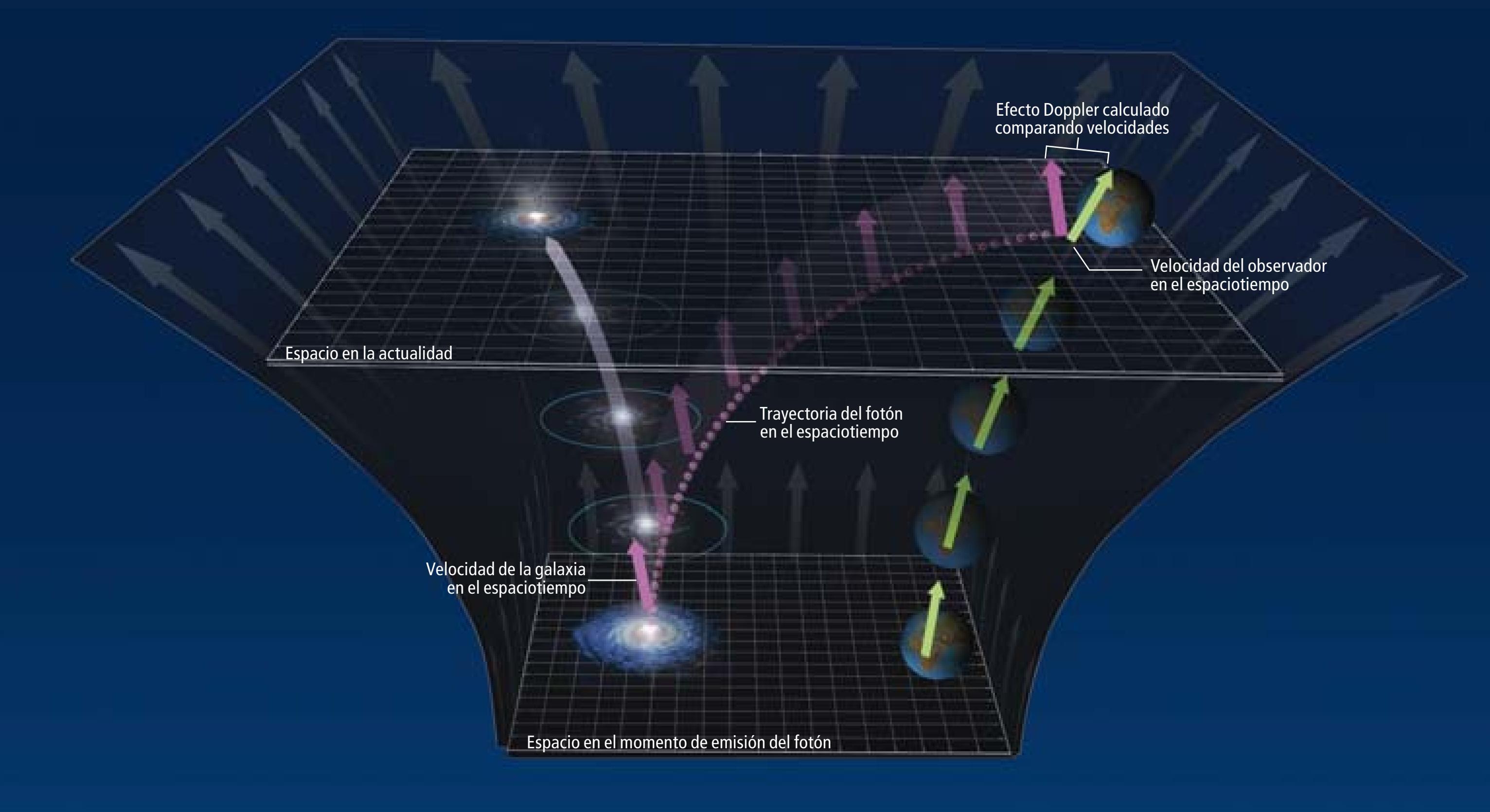
Es aquí donde llegamos al límite de los principios de conservación: cuando el tiempo y el espacio son mutables, desaparece la simetría temporal y, por tanto, la ley de conservación de la energía ya no tiene por qué cumplirse.

Semántica cósmica

En cualquier caso, intentar calcular la energía total del universo se muestra como un ejercicio inútil, ya que tal perspectiva "divina" no se corresponde con la de ningún observador real. En particular, un cálculo semejante no tiene en cuenta la energía del movimiento relativo de las galaxias comóviles, ya que, en dicho sistema de referencia, éstas no poseen energía cinética alguna. Otro problema remite a la energía gravitatoria asociada a la atracción mutua entre galaxias. Un problema clásico de la relatividad general consiste en que la teoría no siempre permite definir sin ambigüedad la energía gravitatoria.

Así las cosas, la energía total del universo ni se conserva ni desaparece: simplemente, no está bien definida. Por otro lado, si abandonamos el punto de vista "divino" y nos concentramos en las partículas individuales, llegamos a lo que numerosos expertos consideran una forma mucho más natural de concebir el viaje de un fotón que proviene de una galaxia lejana. Según dicha interpretación, un fotón no pierde energía. La cuestión radica en la metáfora del globo que se hincha: si bien puede que resulte útil para imaginar el proceso de expansión, la misma no ha de tomarse al pie de la letra. El espacio vacío no posee una realidad física. Cuando las galaxias se alejan unas de otras, es posible considerar que el fenómeno responde a una "expansión del espacio" o a un "movimiento de las galaxias a través del espacio".

MOONRUNNER DESIGN



DESPLAZAMIENTO HACIA EL ROJO DE LAS GALAXIAS COMO EFECTO DOPPLER

Es posible explicar el desplazamiento hacia el rojo de una galaxia como un efecto Doppler idéntico al que veríamos en un coche de policía que se alejase de nosotros a la misma velocidad relativa que la galaxia. Para ello, el término "velocidad relativa" ha de interpretarse de la manera adecuada. En primer lugar, hay que trazar las trayectorias de la galaxia y del observador no en el espacio, sino en el espaciotiempo. En el esquema que se muestra arriba, el espacio se representa como una superficie bidimensional que evoluciona con el tiempo (simbolizado aquí como la tercera dimensión). En segundo lugar, hay que comparar la velocidad de la galaxia en el momento en que emitió el fotón (*morado*) con la velocidad del observador en el momento en que lo recibe (*verde*). Por último, ha de aplicarse el formalismo de la relatividad general para calcular la velocidad relativa. El desplazamiento al rojo observado coincide con el desplazamiento Doppler calculado de la manera expuesta. En ese caso, y como pone de manifiesto el ejemplo del coche de policía, la energía de los fotones se conservaría.

La diferencia se reduce, en gran parte, a una cuestión semántica.

Los desplazamientos hacia el rojo cosmológicos se atribuyen normalmente a la expansión del universo, pero, en relatividad general, el espacio es relativo. Lo único que importa es la historia de la galaxia; es decir, la trayectoria que ésta describe en el espaciotiempo. Por ello, deberíamos calcular la velocidad relativa de una galaxia con respecto a la nuestra a partir de la comparación de las trayectorias de ambas en el espaciotiempo. Si lo hacemos con cuidado y siguiendo cierta prescripción propuesta por algunos expertos, comprobaremos que la magnitud del desplazamiento hacia el rojo de la galaxia resulta idéntica al desplazamiento Doppler que un observador vería en un coche que se alejase a la misma velocidad que la galaxia.

La explicación se basa en que, en regiones lo bastante pequeñas, el universo queda descrito, con muy buena aproximación, por un espaciotiempo plano. Pero en un espaciotiempo plano no hay gravedad ni estiramiento de las ondas, por lo que cualquier desplazamiento hacia el rojo ha de deberse al efecto Doppler. Así pues, podemos decir que la luz va sufriendo pequeños desplazamientos Doppler a lo largo de su trayectoria. Tal y como ocurre con el coche de policía (donde no cabe concluir que los fotones ganen o pierdan energía), también aquí el movimiento relativo entre emisor y receptor implica que ambos ven los mismos fotones desde perspectivas diferentes, no que los fotones hayan perdido energía por el camino.

Así pues, lo que ocurre es que las energías son medidas por observadores situados en galaxias que se alejan unas de otras, y la diferencia en energías obedece al movimiento relativo.

Aun así, cuando intentamos dilucidar si la energía total del universo se conserva, nos encontramos con una limitación fundamental: no resulta posible definir sin ambigüedades algo que podamos llamar "energía del universo". El universo no viola la ley de conservación de la energía. Más bien, tales asuntos caen fuera de su jurisdicción.

Bibliografía complementaria

SPACETIME AND GEOMETRY: AN INTRODUCTION TO GENERAL RELATIVITY. Sean M. Carroll. Addison-Wesley, 2003.

LAS PARADOJAS DE LA GRAN EXPLOSION. Charles H. Lineweaver y Tamara M. Davis en *Investigación y Ciencia*, págs. 6-19; mayo de 2005.

THE KINEMATIC ORIGIN OF THE COSMOLOGICAL REDSHIFT. Emory F. Bunn y David W. Hogg en *American Journal of Physics*, vol. 77, n.º 8, págs. 688-694; agosto de 2009.


Table 31.
functions
(1)
(2)
(3)
x
Fig. 68.

Fármacos basados en ADN

Tras años de intentos fallidos, una nueva generación de vacunas y medicamentos contra el VIH, la gripe y otras enfermedades persistentes son ahora objeto de ensayos clínicos

Matthew P. Morrow y David B. Weiner

En un reñido debate sostenido hace 10 años, científicos del Instituto Nacional de la Salud de los EE.UU. analizaron dos nuevos y prometedores tipos de vacuna para determinar su eficacia frente a uno de los virus más mortíferos del planeta, el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), causante del sida. Una de las vacunas estaba compuesta por plásmidos, anillos de ADN portadores de un gen de alguna de las cinco proteínas del VIH. Su objetivo era desencadenar en las células del receptor la síntesis de proteínas víricas, con la esperanza de que éstas a su vez provocasen la reacción del sistema inmunitario. El segundo tipo de vacuna empleaba otro virus, el adenovirus, como portador de un único gen del VIH que codificaba una proteína vírica. El fundamento de esa estrategia consistía en utilizar un virus "seguro" para captar la atención de las células inmunitarias a la vez que se intentaba dirigir su respuesta contra la proteína del VIH.

Uno de los autores (Weiner) llevaba trabajando en vacunas de ADN desde hacía ocho años. Esperaba demostrar la importante capacidad de los plásmidos para inducir inmunidad contra los temidos patógenos. Pero los resultados de los ensayos provocaron una gran decepción entre quienes creían en esa primera generación de vacunas de ADN. Los receptores de la vacuna de ADN no respondieron o exhibieron una respuesta inmunitaria débil contra las cinco proteínas del VIH, mientras que los receptores de la vacuna de adenovirus manifestaron una reacción intensa. Quedó claro el mayor potencial terapéutico de los adenovirus para el posterior desarrollo de vacunas contra el VIH.

Los resultados no sorprendieron del todo a los expertos en vacunas de ADN, porque en algunos ensayos previos ya se había observado una respuesta débil a la vacuna. Pero sí decepcionaron, ya que existían buenos motivos para confiar en la seguridad y potencia de la vacuna de plásmidos. Convencidos de la solidez del concepto original, los científicos regresaron al punto de partida para descubrir formas de mejorar la técnica. Esos esfuerzos empiezan a dar frutos. Los ensayos clínicos con animales y humanos están demostrando que una nueva generación de vacunas de plásmidos producen las respuestas deseadas, al tiempo que se mantienen la seguridad y otras ventajas. Esa técnica se está expandiendo ahora a otras formas de inmunoterapia y a la administración directa de medicamentos. Cuando alcancen la madurez, los tratamientos y vacunas basados en ADN constituirán un impulso para hacer frente a varias enfermedades que, hoy en día, carecen de tratamiento.

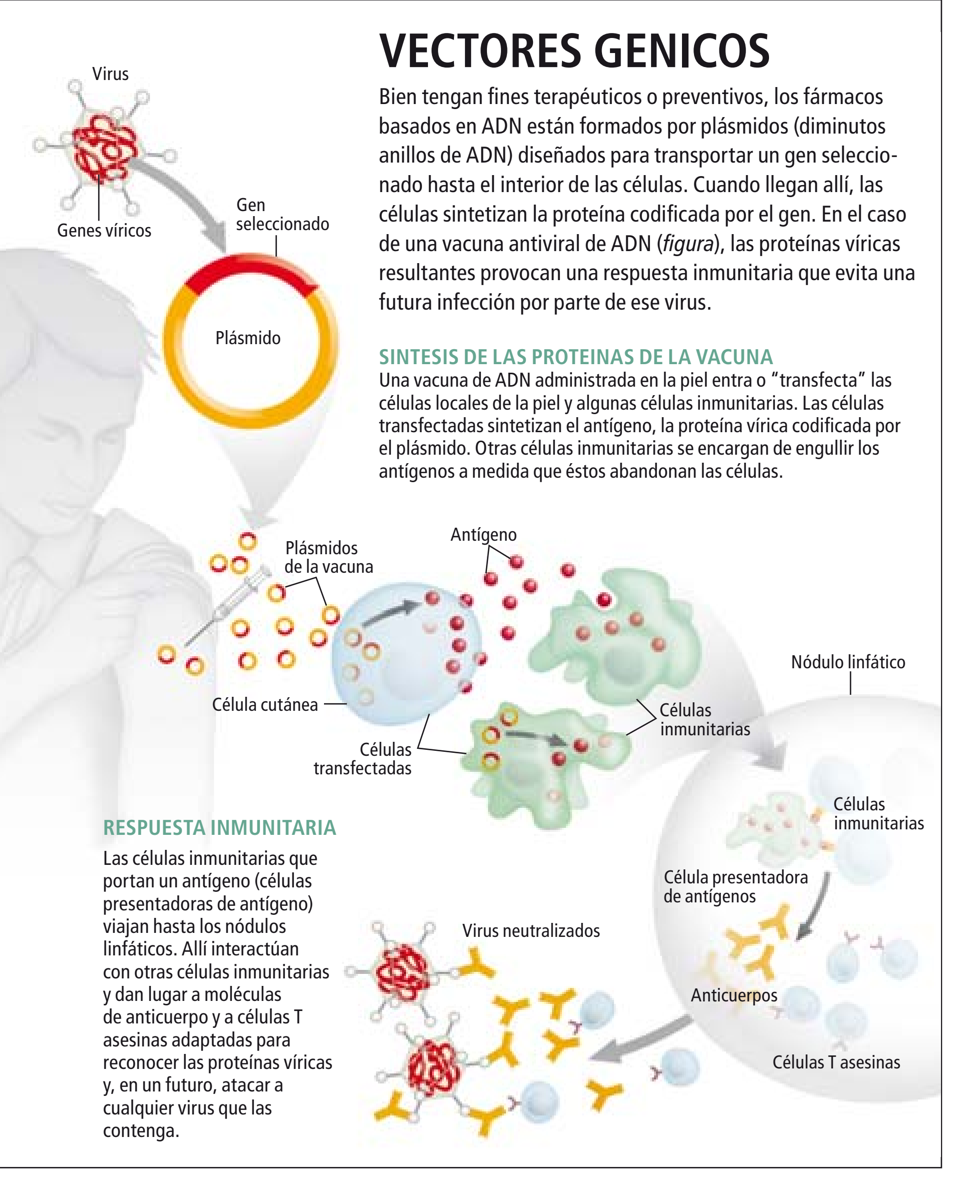
Una buena idea, entonces y ahora

Cuando el concepto de utilizar ADN para inmunizar a las personas comenzó a adquirir fuerza a principios de los noventa, se apreció de inmediato su elegante simplicidad. Los componentes fundamentales de la vacuna (plásmidos construidos para portar genes que codifican una o más proteínas de un patógeno) harían que las células del receptor sintetizasen

CONCEPTOS BASICOS

- Desde hacía tiempo se confiaba en la promesa de las vacunas y terapias basadas en plásmidos (anillos de ADN) para el tratamiento y prevención de enfermedades, pero en los primeros ensayos se comprobó su escasa eficacia.
- Las mejoras en los plásmidos y los nuevos métodos para su administración han incrementado su potencia de forma espectacular.
- Los tratamientos y vacunas basados en ADN que ya se utilizan con animales o que han alcanzado las últimas etapas de los ensayos clínicos con humanos demuestran que los plásmidos están cumpliendo con las expectativas.

STUART BRADSHAW



VECTORES GENICOS

Bien tengan fines terapéuticos o preventivos, los fármacos basados en ADN están formados por plásmidos (diminutos anillos de ADN) diseñados para transportar un gen seleccionado hasta el interior de las células. Cuando llegan allí, las células sintetizan la proteína codificada por el gen. En el caso de una vacuna antiviral de ADN (*figura*), las proteínas víricas resultantes provocan una respuesta inmunitaria que evita una futura infección por parte de ese virus.

SINTESIS DE LAS PROTEINAS DE LA VACUNA
Una vacuna de ADN administrada en la piel entra o "transfecta" las células locales de la piel y algunas células inmunitarias. Las células transfectadas sintetizan el antígeno, la proteína vírica codificada por el plásmido. Otras células inmunitarias se encargan de engullir los antígenos a medida que éstos abandonan las células.

RESPUESTA INMUNITARIA
Las células inmunitarias que portan un antígeno (células presentadoras de antígeno) viajan hasta los nódulos linfáticos. Allí interactúan con otras células inmunitarias y dan lugar a moléculas de anticuerpo y a células T asesinas adaptadas para reconocer las proteínas víricas y, en un futuro, atacar a cualquier virus que las contenga.

PRECISION GRAPHICS

esas proteínas, pero no contendrían las instrucciones necesarias para generar el patógeno entero. Es decir, la vacuna no conllevaría la presencia del patógeno en el organismo.

Cuando los plásmidos se introducen en una célula huésped (transfección), la maquinaria que normalmente decodifica el ADN comienza a leer el gen del plásmido y sintetiza la proteína deseada. Esta es liberada por la célula, de un modo muy parecido a como lo harían las partículas víricas. En el exterior de la célula, las proteínas específicas del patógeno son reconocidas por las células inmunitarias como ajenas al organismo. Se engaña así al sistema inmunitario, que cree que existe una infección, lo que a la larga permitirá el reconocimiento inmunitario y la respuesta contra la proteína foránea. De este modo, con tan sólo introducir un anillo de ADN portador de un gen, se induce la inmunidad que protege contra un patógeno completo.

Además de su seguridad y simplicidad, las vacunas de ADN ofrecen una serie de ventajas sobre otros tipos de vacuna. Su fabricación es más rápida que algunas vacunas tradicionales, como las de la gripe, que requieren la manipulación y el cultivo de virus "vivos" y un proceso de producción de unos cuatro a seis meses de duración como mínimo. El ADN es estable a temperatura ambiente (por suerte para nuestras células), de modo que las vacunas de ADN no necesitarían una refrigeración constante, algo a tener en cuenta en el transporte y almacenamiento de muchas vacunas.

El ADN posee otra ventaja que, en los últimos años, ha influido de forma importante en la reconsideración de esta técnica. El sistema inmunitario no percibe los plásmidos como un material extraño —después de todo, están formados por ADN—, es decir, la vacuna no provoca ninguna respuesta inmunitaria. Sólo la proteína codificada por el gen del plásmido, una vez sintetizada por las células, atrae la atención de los guardianes inmunitarios. Los plásmidos pueden utilizarse así una y otra vez en el mismo receptor para suministrar genes diversos sin temor a que el organismo desarrolle inmunidad contra el portador de ADN y ataque a la vacuna.

Desgraciadamente, en los primeros ensayos clínicos de vacunas de ADN, el problema de la débil respuesta inmunitaria supuso un serio obstáculo. La razón principal de ese fracaso parecía estribar en que los plásmidos de la vacuna no alcanzaban a un número suficiente de células y, en las que conseguían llegar, no se producía una cantidad suficiente de proteínas. La estimulación del sistema inmunitario era insuficiente.

Sin embargo, la técnica rival acabaría por enfrentarse a un problema aún mayor. En 2007, la compañía farmacéutica Merck inició un gran ensayo clínico con una vacuna contra el VIH, el estudio STEP. Se utilizaba el adenovirus AdHu5 para suministrar genes del virus VIH. A la luz de la intensa respuesta inmunitaria observada en experimentos previos con adenovirus, el ensayo despertó grandes dosis de esperanza y entusiasmo. Unos 3000 individuos VIH-negativos recibieron una inyección de la vacuna o del placebo.

Pero, conforme el estudio avanzaba, empezó a evidenciarse una preocupante diferencia entre los dos grupos: las personas vacunadas no estaban más protegidas que las que habían recibido el placebo y, en última instancia, parecían demostrar una mayor vulnerabilidad ante una infección por el VIH. Un recuento inicial reveló que 49 de los 914 hombres vacunados se habían vuelto VIH-positivos; en el grupo tratado con placebo, lo hicieron 33 de

los 922 hombres. A raíz de esa observación, el ensayo STEP se interrumpió en verano de 2009. Todavía se están analizando los datos para identificar la causa de lo acaecido, pero algunos indicios apuntan al portador AdHu5 como posible culpable. En las personas con inmunidad previa hacia el AdHu5, un virus del resfriado común, el sistema inmunitario pudo haber atacado a la vacuna. Sigue sin aclararse por qué algunos receptores de la vacuna demostraron mayor predisposición a la infección por el VIH.

El renacimiento del ADN

Durante los años que precedieron al ensayo STEP, los investigadores todavía convencidos del potencial de los tratamientos basados en ADN seguían esforzándose por resolver las complejas cuestiones que hicieron fracasar la primera generación de vacunas de plásmidos. Los esfuerzos se centraron en impulsar la actividad de los plásmidos. Se pensó en nuevos métodos para introducirlos en las células, en nuevas formas de incrementar la producción de proteínas una vez en su interior y en sustancias que, añadidas a las vacunas, aumentasen la respuesta inmunitaria hacia las proteínas codificadas por la vacuna.

Entre los logros de ese trabajo destacan los nuevos métodos para la administración de la vacuna, que consiguen transferir los plásmidos a un número bastante mayor de células (incluidas las células inmunitarias). Los parches transdérmicos y otros sistemas sin agujas (Gene Gun, Bioject) que utilizan aire comprimido para inyectar la vacuna, introducen los plásmidos en la piel, donde abundan las células presentadoras de antígenos, un tipo de células inmunitarias. Esos métodos fuerzan físicamente la entrada de los plásmidos a un número mayor de células que en el caso de una inyección con aguja. Para obtener un resultado similar al de las vacunas administradas mediante una aguja en el músculo o la piel, se aplica acto seguido una electroporación. Se trata de una serie de impulsos eléctricos que provocan la formación de poros transitorios en las membranas celulares, con lo que se facilita la entrada de los plásmidos a las células. La electroporación multiplica por 1000 la adquisición de plásmidos por parte de las células.

También se han mejorado las construcciones gen-plásmido mediante diversos tipos de refinamientos en las secuencias de ADN de los genes que portan. La optimización de codones implica deletrear las instrucciones del gen de forma que la célula las ejecute más fácilmente. En el código genético, los aminoácidos (bloques fundamentales de las proteínas) se especifican mediante conjuntos de tres "letras" de ADN que forman un codón. Determinados aminoácidos se designan mediante más de un codón, pero las células se decantan por uno de esos codones sinónimos y lo traducen con más eficacia que los otros. Por tanto, la selección de los codones óptimos incrementa la producción celular de la proteína deseada. Los retoques adicionales en la secuencia génica mejoran la estabilidad y la precisión de los transcritos génicos en forma de ARN mensajero (que la célula lee para sintetizar la proteína) y se acelera así la producción de proteína.

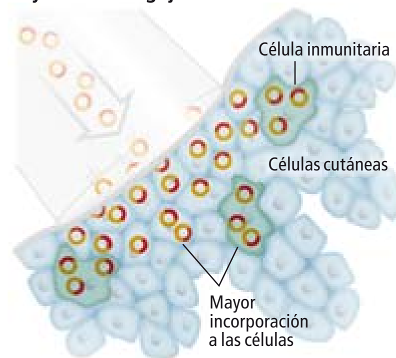
La célula traduce primero la secuencia líder, próxima al inicio de cada gen, en la parte inicial de una proteína. La optimización de una secuencia líder puede mejorar la estabilidad de la proteína resultante. Ciertas secuencias líder pueden incluso marcar una proteína para indicar a la célula que la secrete. Lo cual supone una ventaja, ya que las células inmunitarias

MEJORA DE LA TECNICA

Las técnicas que incrementan la efectividad de las vacunas y terapias basadas en plásmidos han renovado las esperanzas puestas en la estrategia basada en el ADN. Con las mejoras se estimulan la incorporación de los plásmidos a las células, la producción de proteínas codificadas por los plásmidos y las respuestas del sistema inmunitario hacia esas proteínas.

ADMINISTRACION MAS EFICAZ

Inyección sin aguja



Los sistemas de inyección sin agujas administran la vacuna en la piel, donde se concentran las células inmunitarias. Los inyectores permiten introducir de forma directa más plásmidos en las células cutáneas e inmunitarias que las inyecciones con agujas.

Electroporación

Mayor incorporación a las células

Células cutáneas

Células musculares

Poro transitorio

La electroporación, una estimulación eléctrica suave, aumenta la incorporación a las células de los plásmidos administrados mediante una inyección con aguja. Los impulsos eléctricos provocan en las células la abertura breve de poros que permiten la entrada de los plásmidos.

DISEÑO OPTIMIZADO DE PLASMIDOS

Las instrucciones para sintetizar una proteína codificada por un gen del plásmido se pueden deletrear utilizando varias secuencias de "letras" del ADN, pero la selección de determinadas secuencias puede aumentar la cantidad de proteína producida por una célula.

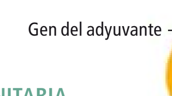
La mejor secuencia génica

Producción elevada de proteína

ESTIMULACION DE LA RESPUESTA INMUNITARIA

Los adyuvantes, sustancias que estimulan a las células inmunitarias, son codificados por los genes añadidos a los plásmidos. Los adyuvantes, que se sintetizan junto con los antígenos, intensifican la respuesta inmunitaria.

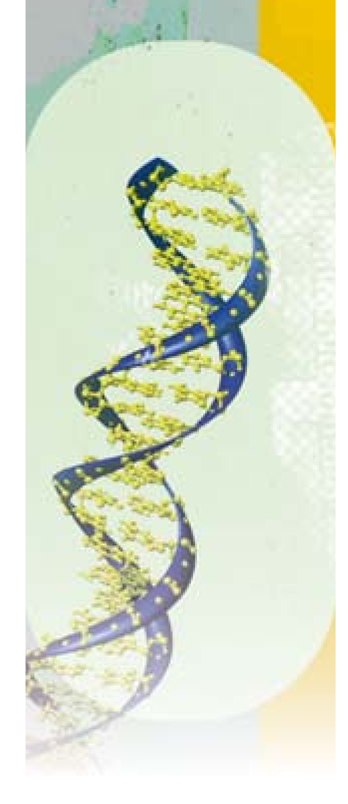
Gen del adyuvante



Gen del antígeno

Mayor respuesta inmunitaria hacia el antígeno

PRECISION GRAPHICS



se toparán con las proteínas foráneas tanto en el interior como en el exterior de las células transfectadas. Las dos situaciones provocan tipos ligeramente distintos de respuesta inmunitaria y la combinación de ambas aumenta la inmunidad global generada por la vacuna.

Una importante mejora final consiste en el empleo de adyuvantes, sustancias que se añaden a las vacunas para potenciar la respuesta inmunitaria. Si se desea, un adyuvante puede incluso predisponer a un tipo de respuesta en detrimento de otra. Se puede favorecer así una mayor producción de células T (que buscan y destruyen a las células infectadas por patógenos) que de anticuerpos proteicos (que intentan evitar que el patógeno acceda al interior de las células). Se ha demostrado que el compuesto Vaxfectin incrementa 200 veces la formación de anticuerpos provocada por una vacuna de ADN contra la gripe. Otro adyuvante, Resiquimod, se aplica junto con algunas vacunas de ADN para desencadenar una intensa respuesta inmunitaria de células T y de anticuerpos.

Otro aspecto relevante de las técnicas basadas en el ADN es la posibilidad de incorporar en el plásmido de la vacuna el gen de una molécula adyuvante. Se evita así añadir adyuvante a la formulación final de la vacuna, algo que a veces genera preocupación en torno al mantenimiento de unas condiciones de emulsificación o de estabilidad adecuadas en la fórmula. A continuación, las células que adquieren los plásmidos sintetizarán el adyuvante codificado junto con las proteínas de la vacuna. Cuando se añaden a las vacunas de ADN adyuvantes codificados por genes, incluso cuando ya se ha optimizado el plásmido, el adyuvante incrementa aún más la respuesta inmunitaria, que por lo menos se quintuplica.

Las nuevas vacunas de diseño basadas en plásmidos se encuentran a años luz de las sencillas construcciones que codificaban proteínas en los albores de la técnica. Con los plásmidos optimizados y los métodos de administración mejorados, la técnica ya estaba a punto de retomarse cuando comenzó el estudio STEP. Y no sólo eso, la estrategia basada en el ADN promete usos que van más allá de la vacunación clásica, entre ellos, la administración mediante plásmidos de algunos medicamentos y de inmunoterapias contra el cáncer.

Una técnica multiusos

La posibilidad de introducir genes en las células con total seguridad y conseguir que éstas sinteticen las proteínas codificadas abre nuevas vías terapéuticas. De hecho, muchos de esos tratamientos basados en ADN adelantan a las vacunas de ADN en la carrera por generalizar su uso en la práctica clínica. Mientras que los fármacos clásicos a menudo adoptan la forma de pequeñas moléculas, los tratamientos basados en ADN suministran un gen para tratar una dolencia. Sin embargo, a diferencia de la terapia génica tradicional, el plásmido no se integra de forma permanente en el genoma del receptor; ni siquiera permanece para siempre en las células, lo que evita algunas de las complicaciones que han obstaculizado el progreso de las terapias génicas.

Como suele ocurrir con las técnicas nuevas, los primeros éxitos de los tratamientos con plásmidos se han producido en animales. Uno de ellos, cuyo uso en cerdos ya se ha autorizado, se ha diseñado para evitar la pérdida del feto. Administrado junto con electroporación a cerdas preñadas, el plásmido entra en las células del animal; éstas sintetizan a continuación una hormona (liberadora de la hormona del crecimiento) que fomenta la supervivencia del feto en gestación. El éxito del tratamiento es alentador, en parte por el efecto que ejerce una única inyección en un animal tan grande, un buen presagio para las terapias en humanos.

En la actualidad, se están realizando varios ensayos clínicos con ese tipo de tratamientos basados en humanos. En uno de ellos se suministran genes de factores de crecimiento, unas proteínas que movilizan a las células madre para tratar la insuficiencia cardiaca congestiva. Otro utiliza un plásmido que codifica el factor de crecimiento IGF-1 para tratar el retraso del crecimiento en pacientes con inmunodeficiencia combinada grave ligada al cromosoma X. Un tercer ensayo se centra en un trastorno circulatorio muy difícil de tratar, la isquemia crítica de los miembros; los factores codificados por el plásmido inducen el crecimiento de nuevos vasos sanguíneos, con la esperanza de evitar una amputación.

Una categoría distinta de tratamientos, la inmunoterapia biológica basada en ADN, combina los mejores aspectos de los tratamientos y las vacunas basados en ADN. Consiste en administrar un gen que provoca una respuesta inmunitaria contra una enfermedad en curso, como un tumor o una infección vírica crónica. En uno de los primeros ensayos se ha utilizado ADN que codifica proteínas víricas para desencadenar el ataque de las células inmunitarias hacia los tumores provocados por el papilomavirus humano (PVH). Los resultados han demostrado que la mitad de los receptores presentan una respuesta de células T contra las proteínas del PVH, y más del 90 por ciento generan niveles elevados de anticuerpos. Otro ensayo examina una inmunoterapia génica basada en ADN contra el virus de la hepatitis C. Los prometedores resultados preliminares de

Los autores

Matthew P. Morrow y **David B. Weiner** colaboran en la Universidad de Pennsylvania, donde Morrow es un investigador posdoctoral. Los estudios realizados durante casi 10 años sobre el VIH les han llevado a su actual interés por las vacunas e inmunoterapias basadas en ADN. Weiner, catedrático de patología y medicina, dirige el programa de doctorado "Terapias y vacunas génicas". Pionero de las vacunas de ADN, llevó las primeras vacunas de plásmidos a los ensayos clínicos. Ha sido asesor de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense y de numerosas compañías farmacéuticas y fabricantes de vacunas que trataban de desarrollar fármacos basados en plásmidos.

ambos estudios revisten importancia porque hoy en día no existen inmunoterapias eficaces contra los tumores provocados por el PVH ni contra la hepatitis C.

En este ámbito, las aplicaciones veterinarias llevan la delantera, una vez más, a las humanas. Un tratamiento basado en ADN contra el melanoma canino ha despertado entusiasmo entre los investigadores del cáncer humano. Fabricado por Merial, éste aumenta en un factor de seis el tiempo medio de supervivencia de los perros con melanoma avanzado, en comparación con los perros sin tratar.

De vuelta al futuro

Las docenas de ensayos clínicos sobre tratamientos y vacunas basados en ADN en humanos se han llevado a cabo en los últimos diez años o todavía están en curso. Las vacunas de plásmidos contra la gripe son el paradigma de algunas de las ventajas que la estrategia basada en el ADN ya ha demostrado. Una vacuna contra la gripe, desarrollada por nuestro grupo y que es objeto de los primeros ensayos en humanos, ha conseguido proteger a animales contra las cepas comunes de la gripe y contra la cepa letal de gripe aviar H5N1, que ha infectado a varios cientos de personas. La vacuna ofrece esa amplia protección gracias a que sus plásmidos contienen secuencias consenso de los genes del virus de la gripe, lo que significa que las proteínas víricas resultantes se parecen a las de la gran variedad de cepas existentes del virus de la gripe. Ese tipo de vacunas podría poner fin a la incompatibilidad entre las vacunas contra la gripe estacional y las cepas de gripe que surgen cada año.

Por supuesto, la nueva cepa de la gripe H1N1 que apareció el año pasado y ocasionó una pandemia mundial pone de relieve la necesidad urgente de una nueva estrategia de vacunación. En mayo de 2009, en tan sólo dos semanas se logró producir una versión experimental de una vacuna de ADN contra H1N1, fabricada por la farmacéutica Vical. De haberse evaluado y autorizado con anterioridad, ese tipo de vacuna podría haberse fabricado en grandes cantidades al menos dos meses antes de que aparecieran las vacunas estándar. Actualmente se están realizando los primeros ensayos clínicos en humanos, con resultados alentadores.

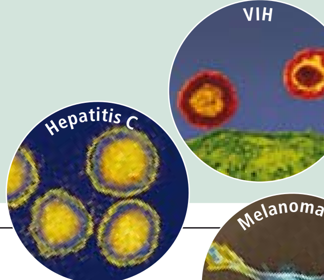
El potencial de las terapias y vacunas basadas en ADN en las enfermedades para las que no existe tratamiento ha hecho reconsiderar esta técnica en la pugna por conseguir una vacuna contra el VIH. Una vacuna en fase de investigación en humanos, Pennvax-B, contiene tres genes del virus VIH, además de genes que codifican moléculas adyuvantes, y se suministra mediante electroporación. Se están evaluando otras dos vacunas que forman parte de una estrategia en dos pasos: primero se introducen los plásmidos para sensibilizar a las células inmunitarias para que reconozcan a las proteínas del VIH; a continuación, se administra otro tipo de vacuna para potenciar la respuesta inmunitaria inicial. Una de ellas, GeoVax, se está administrando junto con una vacuna vírica, con el virus vaccinia de Ankara modificado, que opera a modo de estímulo. Y hoy en día, en lo que resulta una divertida ironía, el Centro de Investigación de Vacunas del Instituto Nacional de la Salud de EE.UU. está evaluando otra vacuna génica contra el VIH que utiliza como potenciadora una de las dos vacunas de adenovirus contra el VIH.

El hecho de que varios tratamientos y vacunas basados en ADN ya se estén aplicando en animales, y algunos de ellos hayan alcanzado las últimas fases de amplios ensayos clínicos con humanos sobre enfermedades difíciles de tratar, pone de manifiesto lo lejos que ha llegado la técnica. Quienes han defendido la técnica desde su nacimiento, no pueden evitar sentirse orgullosos al observar su resurgimiento, tras un inicio difícil, y su futuro prometedor.

EL POTENCIAL DEL ADN

Se están estudiando en humanos varias vacunas y terapias basadas en plásmidos que tienen como objeto una amplia gama de enfermedades; algunas ya han sido aprobadas para su uso en animales. La tabla inferior recoge una selección de las enfermedades contra las que se dirigen los productos. Estos se encuentran en fase de investigación en humanos o ya se están comercializando para su uso en animales.

PRODUCTO	ENFERMEDAD TRATADA EN ENSAYOS CON HUMANOS	ENFERMEDAD TRATADA EN ANIMALES
Vacunas para prevenir la enfermedad	■ VIH (3 vacunas) ■ Gripe (2 vacunas)	■ Virus del oeste del Nilo (caballos) ■ Virus de la necrosis hematopoyética infecciosa (salmón de piscifactoría)
Tratamientos que estimulan el sistema inmunitario contra enfermedades en curso	■ Hepatitis C ■ VIH ■ Tumores inducidos por el papilomavirus humano ■ Cáncer de hígado ■ Melanoma	■ Melanoma (perros)
Tratamientos que sintetizan las proteínas necesarias	■ Insuficiencia cardiaca congestiva ■ Retraso del crecimiento provocado por una inmunodeficiencia combinada grave ligada al cromosoma X ■ Trastornos circulatorios en las extremidades (3 tratamientos) ■ Melanoma	■ Pérdida del feto (cerdos)



Bibliografía complementaria

DNA VACCINES FOR HIV: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES. David A. Hokey y David B. Weiner en *Springer Seminars in Immunopathology*, vol. 28, n.º 3, págs. 267-279; noviembre de 2006.

DNA VACCINES: PRECISION TOOLS FOR ACTIVATING EFFECTIVE IMMUNITY AGAINST CANCER. Jason Rice y col. en *Nature Reviews Cancer*, vol. 8, n.º 2, págs. 108-120; febrero de 2008.

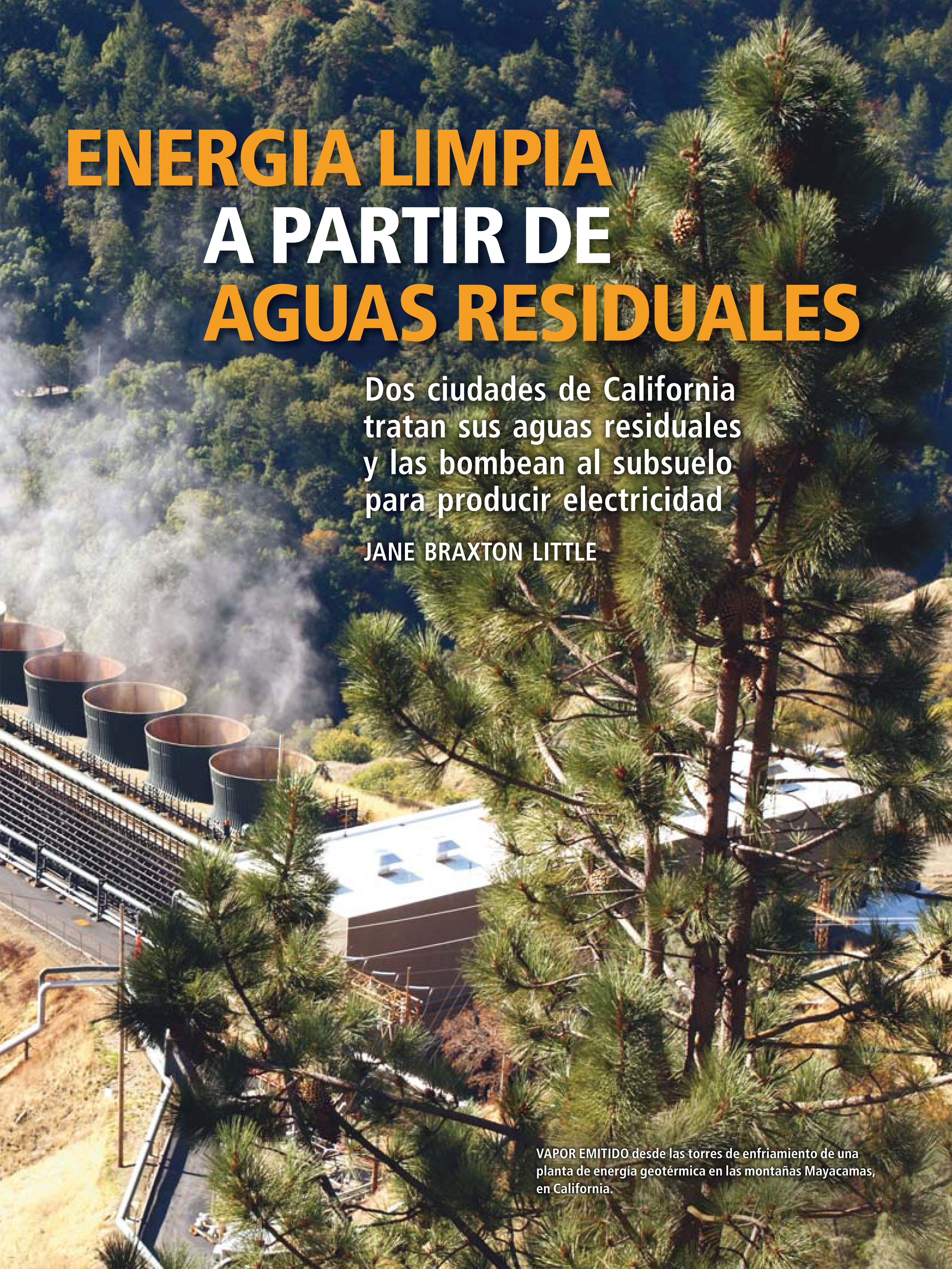
ELECTROPORATION OF SYNTHETIC DNA ANTIGENS OFFERS PROTECTION IN NONHUMAN PRIMATES CHALLENGED WITH HIGHLY PATHOGENIC AVIAN INFLUENZA VIRUS. Dominick J. Laddy y col. en *Journal of Virology*, vol. 83, n.º 9, págs. 4624-4630; mayo de 2009.

TOP TO BOTTOM: KLAUS BOLLER *Photo Researchers, Inc.*; JAMES CAVALLINI *Photo Researchers, Inc.*; STEVE GSCHMEISSNER *Photo Researchers, Inc.*



CONCEPTOS BASICOS

- La inyección en el subsuelo de aguas residuales depuradas sirve para generar energía geotérmica limpia y facilita la eliminación de residuos.
- En California, dos proyectos pioneros han demostrado la viabilidad de la técnica.
- Existe una grave complicación: la extracción de vapor genera pequeños temblores de tierra en las inmediaciones de las plantas de energía.



ENERGIA LIMPIA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES

Dos ciudades de California tratan sus aguas residuales y las bombean al subsuelo para producir electricidad

JANE BRAXTON LITTLE

VAPOR EMITIDO desde las torres de enfriamiento de una planta de energía geotérmica en las montañas Mayacamas, en California.



EL RIO RUSSIAN, cerca de Santa Rosa. La calidad de sus aguas mejoró tras el cese de los vertidos de aguas residuales.

Cuando un residente de Santa Rosa (California) acciona el interruptor de la luz, puede presumir de haber contribuido a la energía que gasta. Santa Rosa y Calpine Corporation conforman el mayor proyecto mundial de explotación geotérmica de aguas residuales para la generación de energía limpia, algo que no sólo beneficia a sus habitantes, sino también a los peces de la zona. Para la ciudad, además del fin de las sanciones económicas por contaminar el río Russian, el proyecto ha permitido ahorrar 400 millones de dólares en la construcción de nuevos depósitos para aguas residuales. Para Calpine, el acuerdo ha dado nueva vida a sus yacimientos de vapor, los cuales languidecían después de años de uso abusivo.

Cada día, el Proyecto de Recarga de Los Géiseres de Santa Rosa bombea cerca de 45 millones de litros de aguas residuales depuradas hasta la cima de una montaña sita a 65 kilómetros de la ciudad. Desde allí, se inyectan en un acuífero a 2500 metros de profundidad. La roca caliente hierve el agua, el vapor asciende a la superficie y activa las turbinas de los generadores de electricidad. En el condado de Lake, una localidad vecina, un proyecto similar recicla unos 30 millones de litros de aguas residuales al día. Ambas instalaciones generan un total de 200 megawatt (el equivalente a una central eléctrica modesta) sin emitir a la atmósfera ningún gas de efecto invernadero ni contaminante. Parte de la energía llega incluso hasta San Francisco, unos 110 kilómetros al sur.

El gobierno de Barack Obama ha decidido apostar por la geotermia como fuente de energía limpia. Según el Departamento de Energía, hacia 2050 esta técnica podría suministrar el 10 por ciento del consumo eléctrico del país. Otras estimaciones superan dicha cifra. No obstante, existe un problema: los pequeños temblores de tierra que provoca la extracción de vapor. De hecho, los residentes ya han acusado una agitación sísmica creciente y temen que proyectos adicionales agraven la situación.

Sin embargo, según Dan Carlson (director delegado de las operaciones en Santa Rosa), las ventajas que la ciudad recibe a cambio son numerosas. Además, la asociación con Calpine ofreció un modelo de soluciones creativas a problemas municipales que se antojaban abrumadores. También en otras poblaciones se están estudiando formas diferentes de explotar la energía geotérmica.

Bombear en vez de verter

Lo singular en Santa Rosa se halla en Los Géiseres (un nombre equívoco para lo que en realidad son fumarolas: grietas en la roca que expelen vapor). Desde la ciudad se divisa el vapor que brota de las montañas Mayacamas; algo que, hasta hace poco, no pasaba de un detalle pintoresco. En 1993, Santa Rosa se enfrentaba a una orden de suspensión y abandono y a una posible moratoria en la construcción como consecuencia de los vertidos ilegales de sus aguas residuales en el río Russian, un importante criadero para especies en peligro como el salmón plateado o la trucha arcoíris. Las autoridades municipales buscaban una solución. Al otro lado de las Mayacamas, una orden similar obligaba al condado de Lake a suspender los vertidos en el lago Clear, el mayor depósito de agua dulce de California. Aun depurada según las normas vigentes, el agua residual seguía conteniendo productos nocivos para la vida acuática.

En lo alto de las colinas que separan ambos municipios, la compañía de explotación geotérmica Calpine también se hallaba en apuros. Su producción de electricidad estaba agotando los recursos subterráneos con mayor rapidez de lo que permitía su reposición natural. El vapor no bastaba para abastecer las centrales y la empresa buscaba un suministro adicional de agua que revigorizase los yacimientos.

Los acuerdos con el condado de Lake y con Santa Rosa para llevar sus aguas residuales allí donde hacían falta permitieron resolver los tres problemas a la vez. A día de hoy, el primer proyecto de generación de energía eléctrica a partir de agua reciclada (el del condado de Lake) y el de mayor envergadura (Santa Rosa) se encuentran en fase de ampliación. El condado de Lake planea prolongar la canalización más allá del lago Clear, con el objetivo de incorporar las aguas residuales de Lakeport y otros municipios. En noviembre de 2008, la ciudad vecina de Windsor firmó un acuerdo para bombear, durante los 30 años siguientes, 2,6 millones de litros diarios de aguas residuales en los conductos de Santa Rosa.

Las autoridades se muestran orgullosas de sus logros ambientales, pero también de la estabilidad normativa y financiera que han logrado.

Cuna de una industria

La pérdida de vapor en Los Géiseres tuvo lugar como consecuencia de una larga sobreexplotación. Activos desde hace miles de años, Los Géiseres forman parte del sistema geotérmico oriental de la falla de San Andrés. A más de 8 kilómetros de profundidad yace una enorme cámara de magma que calienta un depósito de grauvaca, una arenisca gris. El agua allí atrapada hierve y su vapor se filtra a través de las delgadas fisuras de la roca.

Cuando William Bell Elliott recorrió la zona en 1847 como parte de una expedición,

TIMOTHY ARCHIBALD (*páginas anteriores y río Russian*)

bautizó el lugar con el nombre de "Los Géiseres". En realidad, se trataba de fumarolas, no de las espectaculares erupciones de vapor a las que hacía referencia Elliott. Pero el nombre prosperó y la noticia del descubrimiento atrajo un continuo flujo de visitantes (entre ellos, a los presidentes de EE.UU. Ulysses S. Grant y Theodore Roosevelt). Hacia los años treinta del siglo xx, sin embargo, el turismo decayó como consecuencia de una serie de corrimientos de tierra y la inminencia de la guerra.

Algo antes, mientras los turistas aún disfrutaban del vapor, John D. Grant construía en Los Géiseres la primera planta de energía geotérmica de EE.UU. La completó en 1921. Pese a los reventones en la canalización y algún accidente en los pozos, Grant llegó a generar 250 kilowatt, potencia que bastaba para iluminar las calles y edificios del Complejo Turístico de Los Géiseres.

Hacia 1960 los adelantos técnicos mejoraron la viabilidad de esta fuente de energía. Mediante perforaciones en la roca para extraer directamente el vapor, Pacific Gas y Electric Company comenzaron la explotación de una central que generaba hasta 11 megawatt. Otras compañías construyeron nuevas plantas durante los años setenta y ochenta. En 1987, la producción de energía alcanzó un máximo de 2000 megawatt, lo suficiente para abastecer a dos millones de viviendas. Calpine se incorporó a la industria geotérmica en 1989 y hoy explota 19 de las 21 centrales de Los Géiseres, repartidas en unos 100 kilómetros cuadrados de pronunciadas pendientes y cientos de pozos de vapor.

Escasez de vapor

Tal cantidad de perforaciones y bombeos mermó los yacimientos. Las lluvias no impregnaban la arenisca con la rapidez necesaria para

Las aguas residuales se emplean en reponer unos yacimientos de vapor casi extintos



CHUCK CARTER Y PAUL MORIN

Los 200 megawatt generados a partir de aguas residuales reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en unos 1000 millones de kilogramos anuales

reponer las reservas. En 1999, la producción había descendido de manera significativa, por lo que Calpine comenzó a buscar agua para inyectar en el subsuelo. El proyecto con Santa Rosa ascendía a 250 millones de dólares y planteaba desafíos técnicos más complejos que su homólogo con el condado de Lake, más próximo a los yacimientos de vapor. Desde Santa Rosa a Los Géiseres, los conductos de aguas residuales han de atravesar las zonas residenciales de la periferia y campo abierto antes de emprender, en las Mayacamas, un ascenso de 1000 metros.

La canalización se hizo de modo que pasase lo más desapercibida posible. Mike Sherman, coordinador de operaciones para Los Géiseres en Santa Rosa, enfatiza la responsabilidad ambiental de la población. El viaje de 65 kilómetros desde la planta urbana de depuración de Laguna discurre entre manzanos silvestres, madroños de corteza roja y robles majestuosos. Gran parte del terreno, gestionado por la organización Audubon para la conservación de la naturaleza, cuenta con la calificación de espacio protegido.

Una carretera muy inclinada conduce a la cima, donde se alza un gran contenedor del tamaño de un edificio de tres pisos. Salvo en lo que respecta a su capacidad (3800 metros cúbicos), resulta idéntico a cualquier depósito municipal de aguas residuales. El agua allí almacenada ha sido sometida a tres etapas de depuración: un proceso físico en tanques de sedimentación para eliminar grasa, aceites y otras impurezas; un tratamiento biológico para descomponer la materia orgánica y separar nutrientes y otros compuestos, y un filtrado con carbón activado o con arena para eliminar la materia orgánica y los parásitos. Una exposición posterior a luz ultravioleta extermina las bacterias supervivientes.

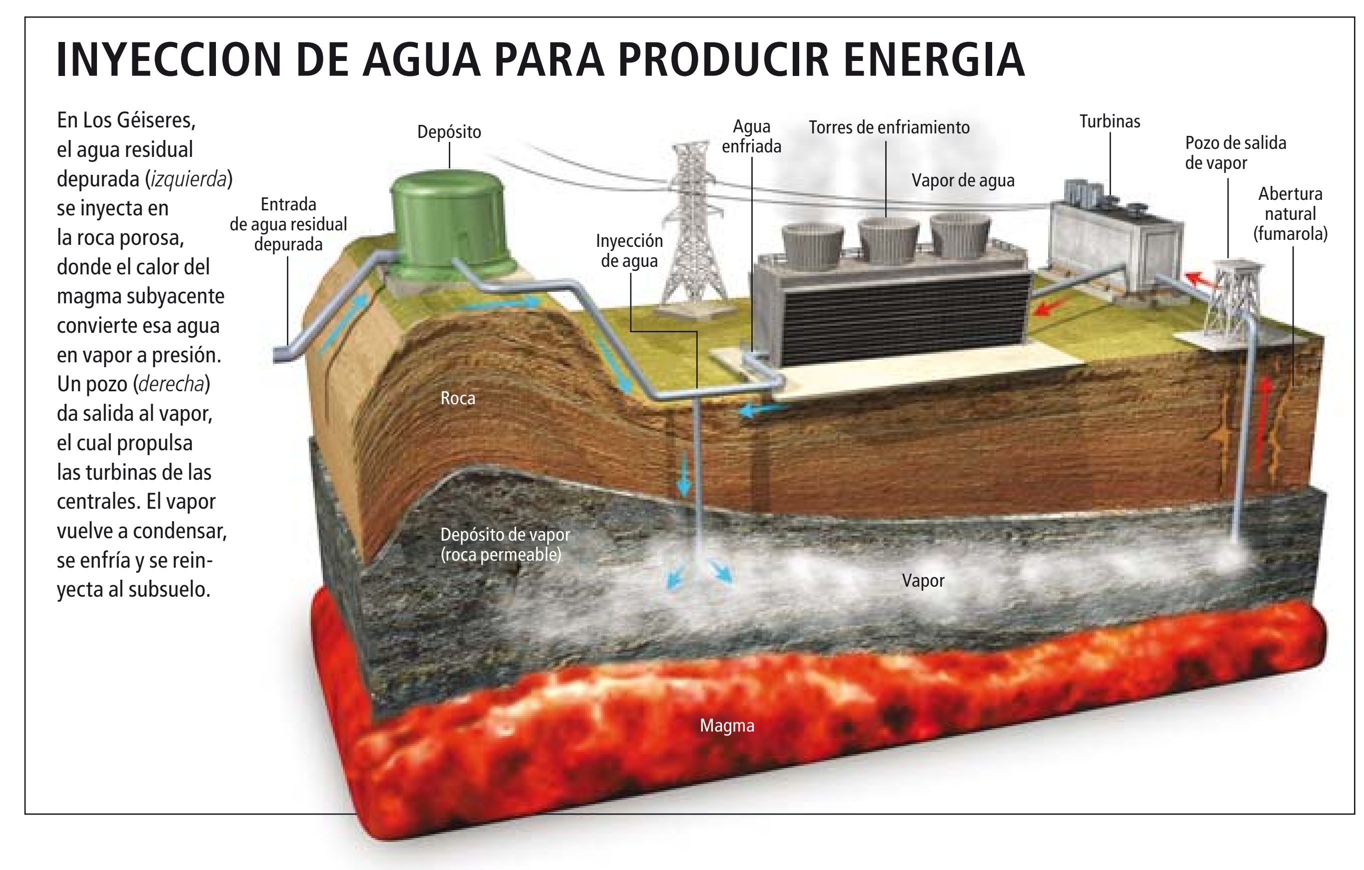
Cada año, Calpine invierte 2,5 millones de dólares de su propia producción energética en bombear el agua hasta la cima. Allí se almacena antes de ser inyectada en los yacimientos de vapor. Más allá del depósito, el pinar desciende hasta un valle donde se entrelazan numerosas tuberías. En las centrales, instaladas a unos 800 metros de distancia, el vapor emanado del suelo acciona las turbinas y condensa de nuevo en agua. Esa agua se enfría y se inyecta otra vez en el subsuelo. Para tratarse de la mayor planta de energía geotérmica del mundo, el paisaje circundante se muestra extrañamente bucólico, sólo alterado por el débil zumbido de las máquinas.

Incremento de la actividad sísmica

Sin embargo, las perspectivas no se presentan tan idílicas para quienes residen en un radio de 30 kilómetros en torno a los yacimientos. Desde que Calpine comenzase a inyectar agua, los habitantes de la zona han registrado un incremento considerable de la actividad sísmica: hasta un 60 por ciento más desde 2003. La región de los manantiales Anderson, a menos

INYECCION DE AGUA PARA PRODUCIR ENERGIA

En Los Géiseres, el agua residual depurada (*izquierda*) se inyecta en la roca porosa, donde el calor del magma subyacente convierte esa agua en vapor a presión. Un pozo (*derecha*) da salida al vapor, el cual propulsa las turbinas de las centrales. El vapor vuelve a condensar, se enfría y se reinyecta al subsuelo.



DON FOLEY

de dos kilómetros de la instalación más cercana, ha sufrido ya 2562 temblores, 24 de ellos de una intensidad superior a 4,0. La mayoría no provoca daños, pero, según Hamilton Hess, profesor retirado de la Universidad de San Francisco y habitante ocasional de la región desde 1939, algunas sacudidas hacen caer los objetos de las estanterías e incluso agrietan los cimientos de los edificios. Los temblores diarios suponen algo más que una molestia. "Se oye un ruido sordo que baja por el cañón y, cuando llega, es como si algo explotara bajo la casa", declara Jeffrey D. Gospe, presidente de la Alianza Comunal de los Manantiales Anderson.

En 2009 se enfrentaron a un riesgo sísmico aún mayor. Ello fue debido a otro proyecto experimental, ajeno a los yacimientos de Los Géiseres pero a sólo tres kilómetros de los manantiales Anderson. Dado que en esa zona no existía actividad geotérmica en la superficie, AltaRock Energy, una empresa de la ciudad de Sausalito, comenzó a perforar a más de tres kilómetros de profundidad para fracturar el lecho de roca caliente, inyectar agua y extraer el vapor resultante.

En 2006, en la ciudad suiza de Basilea, un proyecto similar de activación geotérmica provocó un terremoto de intensidad 3,4. Modesto según ciertos patrones, pero suficiente para provocar daños por valor de 6 millones de euros. Los técnicos de AltaRock alegaron que, en el caso del condado de Lake, la geología del subsuelo, la distancia a fallas de envergadura y el empleo de técnicas no disponibles en Basilea garantizaban la seguridad del proyecto. La explicación no satisfizo a los residentes, quienes siguieron protestando y señalando errores en los análisis ambientales de AltaRock.

Cuando se extrae vapor de un depósito subterráneo calentado por magma, la roca se enfría y se contrae. Como explica David Oppenheimer, sismólogo del Servicio Geológico de EE.UU., el terreno se deforma para acomodarse a esa contracción y se desencadenan pequeños terremotos. Además, la roca que rodea al espacio vacío dejado por el vapor puede desmoronarse y producir nuevos temblores.

Los expertos del proyecto en Santa Rosa predijeron un aumento de la actividad sísmica. A pesar de todo, el municipio decidió continuar, persuadido de que la solución de la crisis de los residuos y la producción de energía limpia compensarían con creces los riesgos. Un pobre consuelo para los 500 residentes que habitan a menos de 30 kilómetros de Los Géiseres.

Las ampliaciones previstas también preocupan. ¿Sería posible que la inyección de mayores cantidades de agua desencadenase el temido "gran terremoto" en la falla de San Andrés? Oppenheimer afirma que no parece muy verosímil. Un incremento en la producción puede acarrear un mayor número de temblores de intensidad inferior a 2,0. Pero un terremoto de magnitud próxima a 8,0 requiere la proximidad de una falla importante, y en la región de Los Géiseres sólo hay pequeñas fracturas. En más de 30 años de observación, la máxima intensidad registrada ha sido de 4,5.

Sin embargo, la inquietud provocada por el proyecto de AltaRock fue mayor. En julio de 2009, las agencias federales lo suspendieron hasta que un estudio determinase mejor los riesgos sísmicos. Como consecuencia de la incertidumbre, AltaRock comunicó en diciembre su retirada. En enero de 2010, el Departamento de Energía de EE.UU. estableció nuevos requisitos de seguridad para todos los proyectos de incremento de la actividad geotérmica.

Otros beneficios

Al generar 200 megawatt de electricidad a partir de aguas residuales, Santa Rosa y el condado de Lake han reducido sus emisiones de gases de efecto invernadero en unos 1000 millones de kilogramos anuales (la cantidad que arrojaría una planta térmica de carbón de potencia equiparable). Además, al no verter residuos al río Russian ni al lago Clear, tampoco se necesitan nuevas instalaciones de depuración y depósito. Y dado que Calpine aprovecha las aguas residuales en vez de tomarlas de los afluentes del río Russian (sobre cuya agua la compañía tiene los derechos), los peces de la región disfrutan de una mayor cantidad de agua fresca.

El proyecto de Calpine representa una valiosa experiencia para todos aquellos que deseen extender el uso de la energía geotérmica. No obstante, el fracaso de AltaRock podría perjudicar a otros proyectos de activación geotérmica en regiones donde no existe actividad superficial. Según un estudio dirigido por Jefferson W. Wester, de la Universidad Cornell, tales operaciones supondrían unos 100.000 megawatt para EE.UU. En mayo de 2009, el gobierno estadounidense ofreció 350 millones de dólares para energía geotérmica. De ellos, 80 millones quedaron reservados para proyectos de activación geotérmica similares al de Calpine.

Según Carlson, las centrales de Los Géiseres han demostrado la viabilidad económica de emplear agua residual depurada (en vez de agua dulce) para generar electricidad. No cabe duda de que los aspectos relativos a la seguridad han de estudiarse con más detalle.

Los habitantes de la zona piden cambios en las explotaciones geotérmicas. En los últimos años ha aumentado la actividad sísmica de la zona.

Bibliografía complementaria

A GEYSERS ALBUM: FIVE ERAS OF GEOTHERMAL HISTORY. Susan F. Hodgson. California Department of Conservation; Sacramento, 1997.

SANTA ROSA GEYSERS RECHARGE PROJECT. California Energy Commission, 2002. Disponible en www.energy.ca.gov/reports/2003-03-01_500-02-078V1.PDF

THE FUTURE OF GEOTHERMAL ENERGY: IMPACT OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS (EGS) ON THE UNITED STATES IN THE 21ST CENTURY. Evaluación de un panel interdisciplinar dirigido por el MIT. MIT, 2006. Disponible en http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf

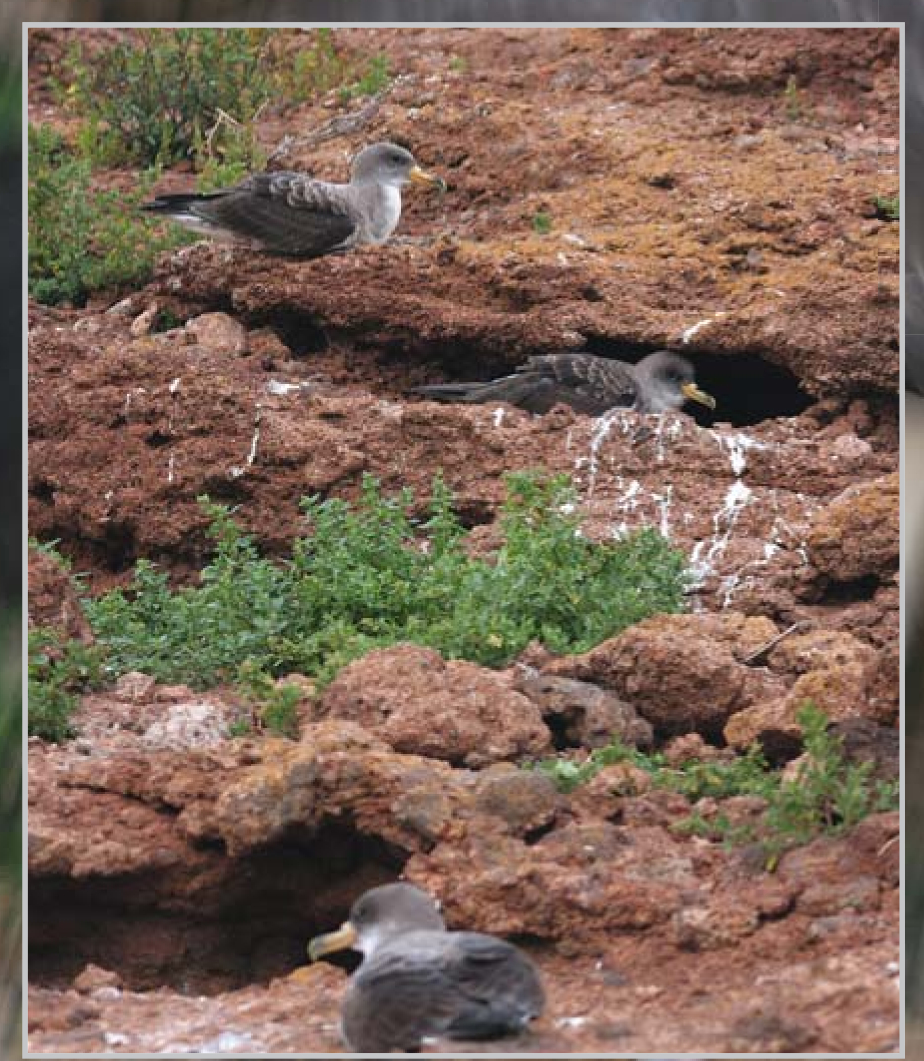
TIMOTHY ARCHIBALD

A plena luz

Carles Carboneras

Una estrategia frecuente para reducir los encuentros con depredadores consiste en evitar las horas en que éstos están más activos. Así se comportan las pardelas cenicientas (*Calonectris diomedea*) y otras aves marinas en sus colonias de cría de todo el mundo: buscan protección en la oscuridad y acceden a tierra exclusivamente en horas nocturnas. Durante el día, las aves, torpes y lentas, son muy vulnerables en los espacios terrestres abiertos.

Como excepción a la norma, existe un único lugar en el mundo donde las pardelas cenicientas presentan hábitos diurnos. Se trata de las islas Salvajes (30 ºN, 16 ºO), un archipiélago remoto en el Atlántico portugués donde no habitan depredadores terrestres de tamaño suficiente que amenacen a las aves. Las condiciones aparentemente ideales de las islas llevarían a pensar que las pardelas cenicientas gozan de una vida plácida en esa colonia, la mayor del mundo de la especie. Sin embargo, vista de cerca, la realidad es muy distinta. Porque en unas condiciones supuestamente óptimas se hacen visibles los efectos de la densodependencia, una de las fuerzas determinantes en ecología. Y así, en el mes de abril, la isla se convierte en un campo de batalla donde los machos —a veces con la ayuda de sus parejas— se enfrentan entre sí en crueles peleas, con el resultado de heridas graves en los ojos o alrededor del pico. Sorprende que ese comportamiento agresivo no se observe donde las pardelas muestran hábitos únicamente nocturnos. Se ha descrito sólo en ese archipiélago. Las disputas más violentas coincidirían con las zonas de máxima densidad y las horas de visibilidad diurna. Competencia por los recursos, por un lugar en la colonia, por la oportunidad de reproducirse en las mejores condiciones. Combates a plena luz.



1. Las islas Salvajes, de geomorfología volcánica, ofrecen acantilados, cortados y pequeños valles con múltiples cobijos y huecos donde las pardelas instalan sus nidos. La ausencia de depredadores terrestres en esta colonia facilita que las aves ocupen huecos parcialmente abiertos y poco profundos, que resultarían inadecuados en cualquier otra isla.



2. Secuencia de una pelea iniciada entre dos machos, a la que posteriormente se suma la pareja de uno de ellos. Los contendientes se agarran con sus poderosos picos (diseñados para manejar pescado y con la capacidad de perforar la piel), mientras intentan desplazarse, arrastrando al rival.

3. El perdedor muestra heridas notables en la boca y comisuras. Las heridas en los ojos no son infrecuentes.

Cómo paliar el déficit presupuestario

Es necesario frenar la deuda pública si no queremos ahogar el crecimiento futuro

Jeffrey D. Sachs

La persistente crisis económica en EE.UU. y Europa ha avivado el debate sobre las finanzas públicas. En numerosos países, el déficit presupuestario ronda e incluso supera el diez por ciento del producto interior bruto. Sus gobiernos deben demostrar a los ciudadanos y a los mercados financieros que disponen de un plan para hacer frente a unos desequilibrios sin precedentes en tiempos de paz.

Tras el pánico financiero de finales de 2008, la mayoría de las economías adoptaron, en armonía con las ideas keynesianas, paquetes de estímulo basados en un aumento del gasto y en recortes fiscales —algo contra lo que ya advertimos en "Pagar para que el gobierno haga lo que debe hacer", por J. D. Sachs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2009—. Ante el freno en el consumo, se estimó necesario aumentar el gasto público o estimular el gasto privado mediante bajadas impositivas. El pensamiento keynesiano asume que, en tal situación, los mercados financieros adquirirán de inmediato bonos del estado para financiar el estímulo.

Para numerosos países europeos pequeños, como Grecia, semejantes expectativas han resultado demasiado optimistas. Los inversores potenciales desconfiaron de la futura capacidad de los gobiernos para devolver la deuda mediante una combinación de subida de impuestos y reducción del gasto. Como consecuencia, los mercados de bonos dieron un portazo a la financiación de Grecia a principios de 2010 al tiempo que amenazaban con hacer lo mismo en otros países, Reino Unido entre ellos.

Hasta ahora, EE.UU. no se ha visto afectado de la misma manera. A diferencia de Grecia, EE.UU. toma prestado en su propia divisa: mientras que el gobierno griego puede quedarse sin euros, el estadounidense nunca se quedará sin dólares en tanto que la Reserva Federal se los proporcione. Por supuesto, el temor en este caso no es la bancarrota, sino que una financiación del déficit futuro por parte del banco central agudice la inflación.

Pero de todos modos, y aunque los mercados acordasen financiar el déficit, los préstamos a gran escala podrían no ser la mejor solución. Hoy por hoy, un gran déficit presupuestario significa un aumento brusco del porcentaje de la deuda pública con respecto al producto interior bruto. De hecho, la deuda estadounidense pasará de un 37 por ciento del PIB en 2007 a un 70 por ciento en 2011. Y aunque un futuro recorte del gasto y una mayor carga fiscal redujesen el déficit, el coste de afrontar semejante volumen de deuda permanecería y trastocaría la economía.

Por otro lado, el hecho de que el déficit actual exigirá, antes o después, un recorte del gasto y una subida de impuestos atempera, como mínimo, los efectos de estímulo a corto plazo que supuestamente ofrece una bajada de impuestos: en vez de gastarlos, puede que las familias decidan ahorrar dichos recortes ante el temor de futuras subidas fiscales. Y un aumento del precio del dinero como consecuencia del déficit desalentaría cualquier impulso de la inversión privada.

En EE.UU., la profunda división política sobre el papel del gobierno hace la cuestión mucho más difícil. Un aumento de la carga fiscal es tabú. Pero, en contra de la creencia popular, son pocas las partidas presupuestarias superfluas en las que es posible efectuar recortes.

En mi opinión, el mayor derroche se halla en el Pentágono, cuyo presupuesto asciende a un cinco por ciento del PIB y sirve para financiar dos costosas guerras, cientos de bases militares en el extranjero, contratos de servicios y sistemas de armamento a un precio excesivo. A pesar de ello, no existe un consenso público sobre una drástica reducción del desembolso militar.

El acuerdo es aún menor en lo que se refiere al gasto civil, cuya mayor parte se destina a la Seguridad Social, la asistencia sanitaria a mayores de 65 años y a personas con bajos ingresos o a los cupones de comida para familias sin recursos. Otras partidas, como energía sostenible, I+D, infraestructuras o educación superior, lejos de suponer un despilfarro, sufren más bien de una insuficiencia crónica de fondos. Es posible que el gasto realmente innecesario y prescindible no supere el uno por ciento del presupuesto.

Así las cosas, debemos reconsiderar el aumento de las cargas fiscales a las grandes fortunas. Hoy en día, el uno por ciento de los hogares más adinerados de EE.UU. disfruta de más del 20 por ciento de las rentas familiares del país, un porcentaje que se ha duplicado desde 1980. Y el 0,01 por ciento de los más ricos ingresa el cinco por ciento del total.

Además, las grandes fortunas llevan beneficiándose 30 años de los recortes de impuestos. Parece evidente que aumentar su contribución impositiva no será suficiente para equilibrar las cuentas; también habrán de considerarse subidas en los combustibles, cuotas a las emisiones de carbono y puede que hasta un impuesto nacional sobre el valor añadido. Aun así, las grandes fortunas constituyen el lugar adecuado para empezar a poner otra vez orden en las finanzas públicas estadounidenses.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

Merengues, cristales de aire

No hay que batir mucho rato: un batido prolongado de las claras nos daría espumas menos voluminosas y menos resistentes

Hervé This

Cuando las revistas científicas publican títulos tales como "Propiedades reológicas y estructurales de sistemas azucarados aireados que contienen ovoalbúmina" hay que saberlos decodificar para comprender que realmente están hablando de merengues. En el *Journal of Food Science*, los fisicoquímicos K. Lau y E. Dickinson han estudiado las características de las espumas de almíbares con proteínas de clara de huevo, en función de las concentraciones de proteína y de azúcar, así como del tiempo de batido. La calidad del merengue depende de dichos parámetros, que examinamos a continuación.

Las espumas revisten gran interés para los cocineros: permiten, por contraste, percibir mejor la textura en boca de una masa densa y favorecen la percepción de los olores (las moléculas odorantes se aprecian mejor en el aire de las burbujas). Además, en las espumas el gas reduce la cantidad de materia prima que se necesita, una gran virtud en la industria alimentaria: ¡se vende aire!

Una espuma corresponde a una dispersión de burbujas de gas en el seno de un líquido. Las proteínas, como las de la clara batida a punto de nieve, se desenrollan por el efecto cizalla de la batidora, y se dispersan y difunden hacia la interfase aire-agua. Sus zonas hidrófilas se mantienen sumergidas en el agua; sus zonas hidrófobas, emergen al aire. Se reduce así la tensión superficial. Al disminuir la energía necesaria para crear las interfases, el área de la interfase aumenta y con ella el volumen de burbujas.

Las proteínas denominadas globulinas reducen considerablemente la energía superficial. El ovomucoide y las globulinas retrasan el drenaje del líquido entre burbujas, porque incrementan la viscosidad de la clara; ello estabiliza las burbujas. La lisozima forma complejos con la ovomucina y las otras proteínas, con lo que se refuerzan las interfases. En conjunto, las burbujas de aire quedan aprisionadas dentro de un envoltorio rigidizado.

E. Dickinson y K. Lau estudiaron sistemas con concentraciones elevadas de azúcar, como las que encontramos en los merengues y otros productos batidos de pastelería. El azúcar aumenta la viscosidad del líquido, con lo que se ralentiza el drenaje (se estabilizan las espumas) y se reduce el tamaño de las burbujas porque se modifica la energía superficial.

Añadieron clara de huevo en polvo en distintas concentraciones (2, 4, 6, 8 y 10 por ciento) a almíbares a unos 70 ºC. Batieron a punto de nieve las disoluciones obtenidas. Mediante la adición de un colorante específico, midieron en cada una de ellas la viscosidad, el volumen y el tamaño de las burbujas para conocer la constitución de las películas de proteínas.

Al batir las muestras que contienen poca proteína (2 y 4 por ciento), la densidad de las espumas disminuye durante los primeros diez minutos de batido. Después cesa el incremento de volumen. Cuando la concentración de proteína es mayor (6, 8 y 10 por ciento), la densidad disminuye durante los primeros cinco minutos de batido, alcanza un mínimo y después aumenta.

Al empezar el batido se hincha la masa porque se crean burbujas voluminosas. Después, cuando la batidora las rompe, su tamaño disminuye, sin que se creen nuevas burbujas. Al continuar batiendo se desnaturaliza la ovoalbúmina, con lo que aumenta el espesor de las capas de proteína en la superficie de las burbujas y las proteínas forman redes. Finalmente, se obtiene lo que los pasteleros denominan "grumos", o partículas insolubles. Las espumas formadas con elevadas concentraciones de proteína son más finas, más densas y más rígidas porque las películas en la interfase son más gruesas.



La viscosidad de las espumas también depende del tiempo de batido: cuanto más tiempo dure, más viscosas se vuelven las espumas, probablemente porque se adsorben en las interfases mayores cantidades de proteína. En el caso de las espumas con el cuatro por ciento de proteína el comportamiento es distinto: el efecto de cizalla transforma (coagula) las proteínas en complejos insolubles, lo que reduce la viscosidad.

A concentraciones mayores de proteína (del cuatro al diez por ciento), la fluidificación es aún más evidente al aumentar el tiempo de batido: las proteínas coagulan más, dando lugar a películas que se rompen con mayor facilidad. Además, los físicos observaron que el azúcar recristalizaba cuando actuaba el efecto cizalla. Probablemente las proteínas operan a modo de gérmenes de nucleación: dichos cristales degradan la espuma porque rompen las membranas de las burbujas.

A partir de esos análisis, ¿qué puede hacer el cocinero? Yo propongo unos merengues "ligeros", que se obtienen mediante la adición de agua a la clara de huevo. Se reduce así la concentración de proteínas y se forma una espuma más delicada. Dicha espuma debe cocerse a horno muy suave para que la clara coagule antes que se evapore el agua. Se obtienen unos "cristales de aire" que combinan dos cualidades raramente unidas: son deliciosos y dietéticos a la vez.





Origen de las aves modernas

Se pensaba que las aves modernas se habían originado tras la extinción de los dinosaurios. Ahora sabemos que vivieron junto a ellos

GARETH DYKE

Es diciembre en Moscú, y la temperatura cae por debajo de los 15 grados bajo cero. Corre el año 2001 y acabo de visitar el museo de paleontología junto con Evgeny N. Kurochkin, de la Academia de Ciencias Rusa. Ambos participamos en un proyecto que pretende examinar todos los fósiles aviares recolectados en Mongolia por las expediciones conjuntas de soviéticos y mongoles. Entre los restos figura un ala exhumada en 1987 en el desierto del Gobi. Comparada con los esqueletos de dinosaurios de las colecciones del museo, muy bien conservados, esa minúscula ala (de delicados huesos mezclados y aplastados) despierta una escasa atracción. No obstante, ofrece un claro indicio de la contradicción que envuelve la idea ampliamente aceptada sobre la evolución de las aves.

En la actualidad, más de 10.000 especies de aves pueblan la Tierra. Algunas están adaptadas a vivir en mar abierto, a gran distancia de tierra, otras se las apañan en desiertos áridos, y todavía otras moran en la cima de montañas cubiertas de nieve. De hecho, de todas las clases de vertebrados terrestres, la de las aves es con mucho la más diversa. Los biólogos evolutivos han supuesto desde hace tiempo que los antepasados de las aves actuales debieron su éxito al impacto del asteroide que barrió a los dinosaurios y a otros vertebrados terrestres hace unos 65 millones de años. Su razonamiento era sencillo: aunque las aves habían evolucionado antes de dicha catástrofe, las variedades anatómicamente modernas sólo aparecían en el registro fósil con posterioridad a aquel acontecimiento. El alborear de patos, cucos, colibríes y otras formas modernas (cuyo conjunto forma el linaje de los Neornitinos,

1. CODO A CODO. Basada en pruebas fósiles procedentes de la Antártida, esta representación artística ilustra una de las primeras aves modernas, *Vegavis*, alimentándose junto a dinosaurios de pico de pato en un estuario marino, hace unos 67 millones de años.

KAZUHIKO SANO

CONCEPTOS BASICOS

- Se sabe que las aves descienden de pequeños dinosaurios carnívoros. Pero el origen de las aves anatómicamente modernas resulta mucho menos claro.
- Según la hipótesis tradicional, basada en los fósiles, las aves modernas surgieron después del impacto del asteroide que extinguió los dinosaurios y otros animales, hace 65 millones de años.
- Pero los estudios moleculares y una serie de hallazgos de fósiles apuntan ahora a las raíces más profundas de las aves modernas.
- Fósiles de las primitivas aves modernas confirman ese origen más remoto. Se desprende entonces la pregunta de por qué esas aves, y no las arcaicas, sobrevivieron a la extinción en masa.

o “aves nuevas”) parecía un caso clásico de radiación evolutiva en respuesta al desalojo de nichos ecológicos causado por un episodio de extinción. En ese caso, los nichos habían sido ocupados antes por dinosaurios, pterosaurios (reptiles voladores) y aves arcaicas.

Sin embargo, a lo largo de la última década, las pruebas cada vez más concluyentes del registro fósil (entre ellas, aquella ala aplastada) y el análisis de ADN de aves actuales han revelado que las aves neornitinas probablemente se diversificaron con anterioridad a hace 65 millones de años. Los hallazgos han alterado la hipótesis tradicional de la evolución de las aves y han generado nuevas cuestiones sobre el origen evolutivo de esos animales.

Primeras aves

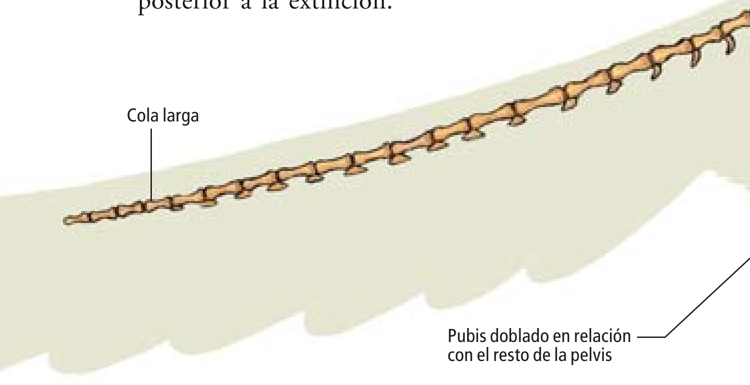
Las aves constituyen uno de los tres grupos de vertebrados que desarrollaron vuelo batido o activo. Los otros dos son los malhadados pterosaurios y los murciélagos. Los últimos aparecieron mucho más tarde y comparten desde entonces los cielos con las aves. Durante años, los paleontólogos estuvieron debatiendo sobre el origen de las primeras aves. Un bando opinaba que habían evolucionado a partir de dinosaurios carnívoros de tamaño reducido, los Terópodos; el otro afirmaba que lo habían hecho a partir de reptiles anteriores. Pero en las dos últimos decenios, los descubrimientos de dinosaurios con aspecto de ave, muchos de ellos cubiertos con plumón, han convencido a la mayoría de que las aves proceden de los dinosaurios terópodos.

Sin embargo, hallar la conexión entre las aves ancestrales y las modernas ha resultado mucho más intrincado. Consideremos *Archaeopteryx*, el ave más antigua conocida, de hace unos 145 millones de años, descubierta en Alemania. De esa especie se conservan las pruebas definitivas más antiguas sobre alas con plumas asimétricas aptas para generar la fuerza ascensional necesaria para el vuelo, una característica distintiva del grupo. Pero el animal guarda mayor semejanza con los dinosaurios de cuerpo pequeño, como *Velociraptor, Deinonychus, Anchiornis* y *Troodon*, que con aves modernas. Al igual que esos dinosaurios, las primeras aves, entre ellas *Archaeopteryx* y otras descubiertas en fecha más reciente (*Jeholornis* en China y *Rahonavis* en Madagascar), poseían una larga cola ósea y algunas contaban con dientes afilados, además de otros rasgos primitivos. Los Neornitinos, en cambio, carecen de estos rasgos y muestran toda una serie de caracteres avanzados. Presentan los huesos de los dedos completamente fusionados y alas sin dedos, lo que reduce el peso del esqueleto y facilita el vuelo. Asimismo, poseen unas muñecas y alas muy flexibles, que aumentan la maniobrabilidad en el aire.

Sin embargo, resultaba imposible determinar cómo y cuándo adquirieron los Neornitinos dichos rasgos, debido a la ausencia de fósiles que documentaran la transición. Ello no significa que el registro fósil careciera de restos aviares intermedios entre las primeras aves y los neornitinos posteriores a la extinción. Era evidente que en el Cretácico temprano, hace más de 100 millones de años, medraban ya aves con una amplia gama de adaptaciones al vuelo y especializaciones ecológicas. Algunas volaban mediante alas grandes y anchas, otras poseían alas largas y delgadas. Algunas vivían en bosques y se alimentaban de insectos y frutos; otras habitaban en las orillas de lagos o en el agua y subsistían a base de peces. Esta increíble diversidad persistió a lo largo de las últimas fases del Cretácico, hace 65 millones de años. Junto con investigadores holandeses del Museo de Historia Natural de Maastricht, he descrito restos de aves con dientes hallados justo debajo del horizonte geológico que señala la extinción del final del Cretácico. Pero todas las aves del Cretácico lo bastante completas para poder ser clasificadas pertenecían a estirpes más antiguas que los Neornitinos, y dichas estirpes no sobrevivieron a la catástrofe. Por esa razón, hasta hace poco, las pruebas disponibles apuntaban a la explicación más sencilla del auge de las aves modernas, esto es, su origen y radiación posterior a la extinción.

El autor

Gareth Dyke, paleontólogo del Colegio Universitario de Dublín, se interesó por el vuelo animal cuando era estudiante universitario en Inglaterra. A partir del estudio de la evolución de las aves y su vuelo, ha descrito fósiles de todo el mundo.



2. LAS AVES EVOLUCIONARON A PARTIR de pequeños dinosaurios carnívoros. Algunas de las aves fósiles más antiguas conocidas, como *Archaeopteryx*, que vivió hace 145 millones de años, conservan varias características primitivas (dientes y una larga cola) que las relacionan con el grupo de los Terópodos. Las aves modernas perdieron esos rasgos y desarrollaron alas sin dedos y muñecas muy flexibles, amén de otros rasgos que mejoraron su capacidad de vuelo.

PATRICIA J. WYNNE

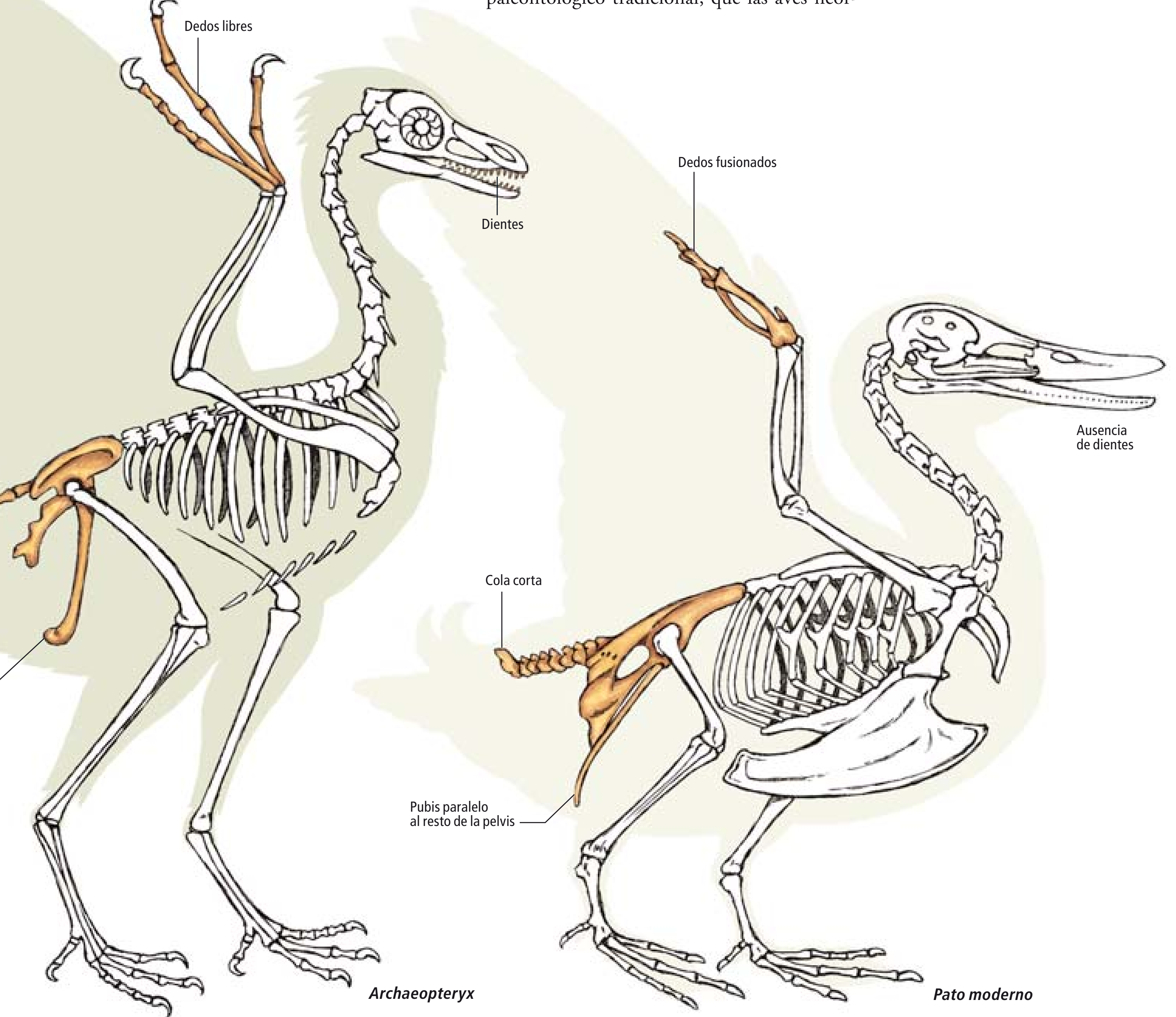
Indicios moleculares

En los años noventa, mientras los paleontólogos seguían buscando sin éxito Neornitinos ancestrales en el Cretácico, iba ganando protagonismo otro método de reconstrucción de la historia evolutiva de los organismos no basado en el registro fósil. Los biólogos moleculares secuenciaban el ADN de organismos vivos y comparaban sus secuencias para estimar el momento en que divergieron dos grupos. Esos cálculos pueden realizarse porque determinadas partes del genoma mutan con cierta periodicidad, lo que permite aplicar la técnica del reloj molecular.

Los biólogos moleculares habían puesto en cuestión, desde hacía tiempo, la hipótesis clásica de la evolución de las aves modernas basada en el registro fósil. De modo que utilizaron la técnica del reloj molecular para estimar las fechas de divergencia de las principales estirpes de las aves modernas. Una de las diferenciaciones más importantes tuvo lugar entre los Paleognatos, de gran tamaño y la mayoría de ellos sin capacidad de vuelo (avestruces, emúes y sus afines), y los Galoánseres (gallinas y otros Galliformes, así como patos y otros Anseriformes). Los estudios de ADN llevaron a la conclusión de que esas dos estirpes (las más primitivas de los Neornitinos actuales) se separaron en pleno Cretácico. Los investigadores obtuvieron fechas de divergencia igualmente antiguas en otros linajes.

Los datos indicaban, en contra del saber paleontológico tradicional, que las aves neor-

Resulta extraño imaginarse un petirrojo posándose sobre el dorso de un *Velociraptor* o un pato anadeando junto a un *Spinosaurus*



> ¿Por qué las aves modernas lograron sobrevivir al impacto del asteroide y a las consiguientes alteraciones ecológicas cuando los pterosaurios, sus parientes aviares más primitivos y compañeros de vuelo, no lo consiguieron?

nitinas habían vivido al mismo tiempo que los dinosaurios. Resulta extraño imaginarse un petirrojo posándose sobre el dorso de un *Velociraptor* o un pato anadeando junto a un *Spinosaurus*. Pero las pruebas moleculares de la contemporaneidad de las aves modernas y de los dinosaurios eran tan convincentes que incluso los paleontólogos (que por lo general habían acogido con escepticismo los hallazgos de ADN, contradictorios con el registro fósil) empezaron a aceptarlas. Aun así, los especialistas en ese campo necesitábamos confirmar, a partir de fósiles, la nueva hipótesis de la evolución de las aves.

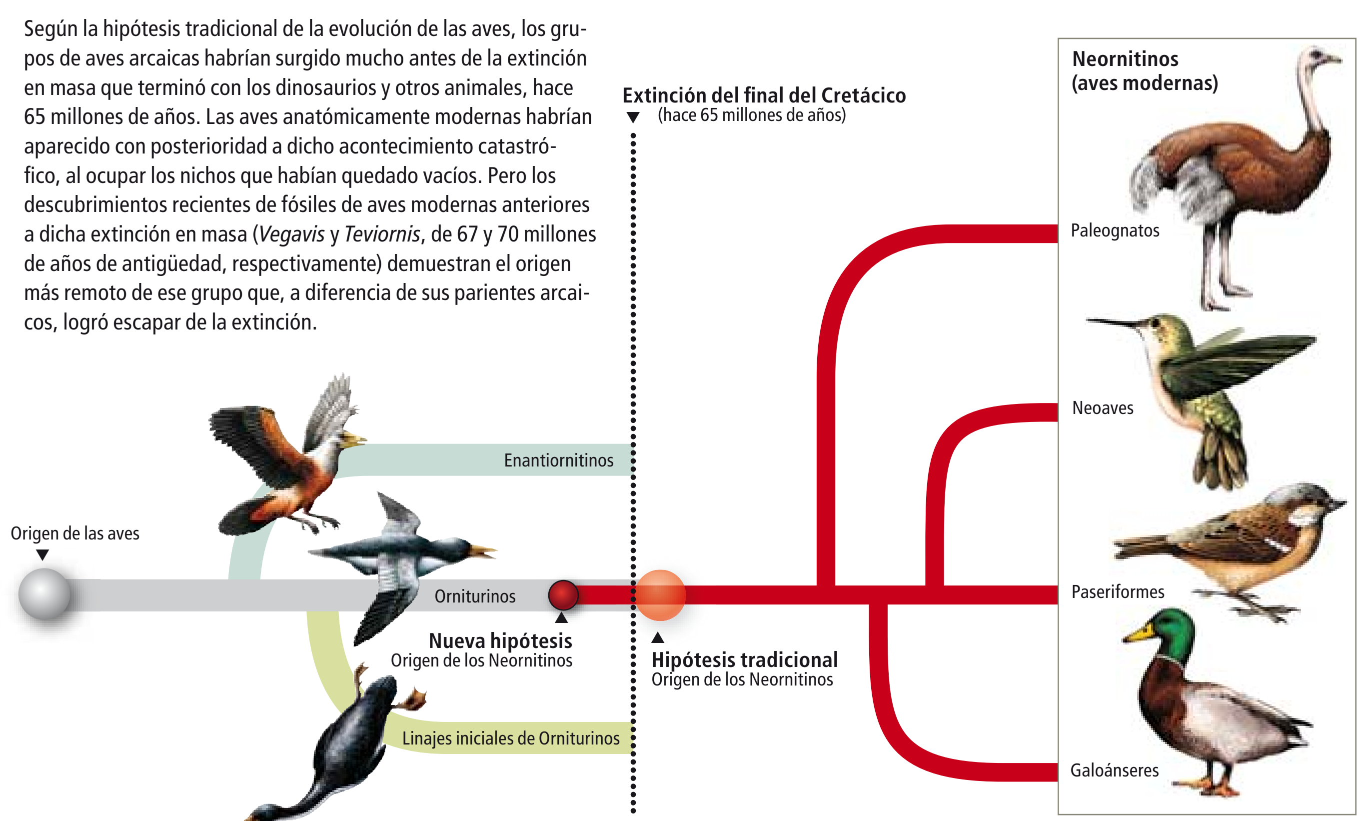
Descubrimientos encadenados

El nuevo milenio deparó una mejor suerte a los paleontólogos, empezando con la diminuta ala de Mongolia que nos llamó la atención en Moscú. Cuando Evgeny vio por primera vez el fósil en 1987, había pensado en su parecido con un miembro de los Presbiornítidos, un grupo extinguido de aves anseriformes emparentado con los patos y gansos actuales. Pero por su antigüedad, de 70 millones de años, correspondía a un ave del Cretácico. Y todos sabían —o creían saber— que no había pruebas definitivas de la presencia de Presbiornítidos en el Cretácico. Pero nuestras comparaciones en el museo en invierno de 2001 demostraron que el ala, con el carpometacarpo (el hueso formado por la fusión de los huesos de la mano) recto y los detalles de los canales, crestas y cicatrices musculares, pertenecía a un presbiornítido. Se trataba, además, del representante inequívoco más antiguo de cualquier grupo de neornitinos. Nuestro hallazgo encajaba perfectamente con las predicciones de los biólogos moleculares. En un artículo publicado en 2002 en el que describimos formalmente el animal, lo denominamos *Teviornis.*

No pasó mucho tiempo antes de que a *Teviornis* se le uniera un segundo neornitino primitivo, *Vegavis*, procedente de la isla Vega, en la Antártida. *Vegavis* se había descubierto en los años noventa, pero había permanecido durante tiempo en un cierto anonimato hasta que se comprendió su verdadero significado. En 2005, el grupo de Julia A. Clarke, en la actualidad en la Universidad de Texas en Austin, publicó un artículo en el que demostraba que *Vegavis*, otra ave del Cretácico, presentaba diversas características propias de los patos modernos, en particular la cintura escapular amplia, la pelvis, los huesos de las alas y las patas inferiores. *Vegavis,* de 66 a 68 millones de años de antigüedad, es algo más reciente que *Teviornis*, pero sin duda todavía antecede a la extinción en masa. Y se trata de un fósil mucho más completo, que conserva la mayor parte del esqueleto.

ORIGEN MAS ANTIGUO

Según la hipótesis tradicional de la evolución de las aves, los grupos de aves arcaicas habrían surgido mucho antes de la extinción en masa que terminó con los dinosaurios y otros animales, hace 65 millones de años. Las aves anatómicamente modernas habrían aparecido con posterioridad a dicho acontecimiento catastrófico, al ocupar los nichos que habían quedado vacíos. Pero los descubrimientos recientes de fósiles de aves modernas anteriores a dicha extinción en masa (*Vegavis* y *Teviornis*, de 67 y 70 millones de años de antigüedad, respectivamente) demuestran el origen más remoto de ese grupo que, a diferencia de sus parientes arcaicos, logró escapar de la extinción.



SHAWN GOULD (*aves fósiles y gorrión*); JEN CHRISTIANSEN (*avestruz, colibrí y pato*)

Para la mayoría de los paleontólogos, *Vegavis* supuso la clave que hizo situar el origen de los Neornitinos en el Cretácico. Con esta nueva hipótesis por confirmar, los investigadores han empezado a reexaminar las colecciones de fósiles de ese período geológico, en búsqueda de otros ejemplares de las primeras aves modernas. Sylvia Hope, de la Academia de Ciencias de California, en San Francisco, insistió durante años que las especies de aves que había identificado a partir de fósiles descubiertos en Nueva Jersey y Wyoming, de entre 80 y 100 millones de años de antigüedad, eran modernas. Pero los hallazgos (en su mayoría huesos únicos) habían sido considerados por otros investigadores como demasiado fragmentarios para producir identificaciones concluyentes. Las revelaciones sobre *Vegavis* y *Teviornis* sugieren que Hope tenía razón. La comparación de los huesos que ella describió con otros restos más completos debería arrojar luz sobre este debate.

Pájaros de buen agüero

Al situar el origen de las aves modernas en el Cretácico, los datos del registro fósil concordaban claramente con las fechas de divergencia basadas en el ADN. Pero hacía plantear una cuestión nueva e inquietante: ¿Por qué lograron las aves modernas sobrevivir al impacto del asteroide y a las consiguientes alteraciones ecológicas cuando los pterosaurios, sus parientes aviares más primitivos y compañeros de vuelo, no lo consiguieron? A mi entender, éste es el único gran misterio por resolver acerca de la evolución de las aves, tarea a la que dedico gran parte de mis investigaciones.

Con sólo un par de neornitinos del Cretácico confirmados, no hay muchas pistas en el registro fósil que nos permitan avanzar. Sin embargo, se han obtenido algunos indicios a partir del estudio de aves actuales. Basándonos en un enorme conjunto de datos de medidas de aves actuales, investigadores del Reino Unido y yo hemos demostrado que las proporciones de los huesos alares de las primeras aves modernas, entre ellas *Teviornis* y *Vegavis*, no son distintas de las de los extinguidos Enantiornitinos. La comparación de las proporciones de los huesos alares fósiles con los de aves actuales nos permite inferir algunos aspectos de la morfología del ala, y con ello obtener información acerca de las capacidades aerodinámicas de las aves fósiles. Pero, hasta donde podemos afirmar, la forma de las alas de los dos grupos de aves fósiles no difiere; en otras palabras, no creemos que los neornitinos primitivos fueran mejores a la hora de volar que los Enantiornitinos, aunque es muy probable que tanto un grupo como otro se desenvolvieran mejor en el aire que las aves primitivas de tipo terópodo, como *Archaeopteryx*.

Si la capacidad de vuelo no confirió a los Neornitinos una ventaja sobre sus parientes del Cretácico, ¿qué se la dio entonces? Varios paleontólogos, entre los que me cuento, hemos propuesto que las diferencias en los hábitos alimentarios habrían supuesto una ventaja competitiva. Para apoyar dicha teoría he demostrado, en una serie de artículos publicados en los últimos años, que las aves modernas, conservadas justo después de la extinción en masa en rocas de 60 millones de años de antigüedad y más recientes, vivieron quizás en ambientes húmedos, sobre todo litorales, lagos, riberas de ríos y alta mar. Muchas de las aves que en la actualidad habitan en estos ambientes, entre ellas los patos, son típicamente generalistas y pueden subsistir a base de una amplia variedad de alimentos. Y hasta ahora, el único linaje confirmado de aves modernas que hemos encontrado en el Cretácico corresponde a las aves anseriformes. En cambio, los grupos de aves del Cretácico que no sobrevivieron al desastre se han identificado en rocas que se formaron en tipos de ambientes muy distintos, entre ellos litorales marinos, tierras interiores, desiertos y bosques. Esta diversidad ecológica indicaría que las aves arcaicas habrían desarrollado especializaciones evolutivas para medrar en cada uno de esos nichos. Así, pues, puede que el secreto del éxito de las primeras aves modernas residiera, simplemente, en su menor especialización con respecto a los demás grupos.

Dicha flexibilidad habría permitido a los Neornitinos adaptarse más fácilmente a las condiciones cambiantes que siguieron al impacto del asteroide. Se trata de una idea atrayente, pero todavía muy prematura. Sólo con el descubrimiento de más fósiles (ya sea sobre el terreno o en los cajones de los museos) podremos determinar de qué manera las aves modernas escaparon de la extinción y emprendieron el vuelo.

PRUEBAS SOLIDAS

Este esqueleto parcial de *Vegavis*, procedente de la isla Vega, en la Antártida, pertenece a un ave de 67 millones de años de antigüedad. Presenta rasgos claramente modernos, entre ellos una cintura escapular amplia y huesos alares fusionados.

Bibliografía complementaria

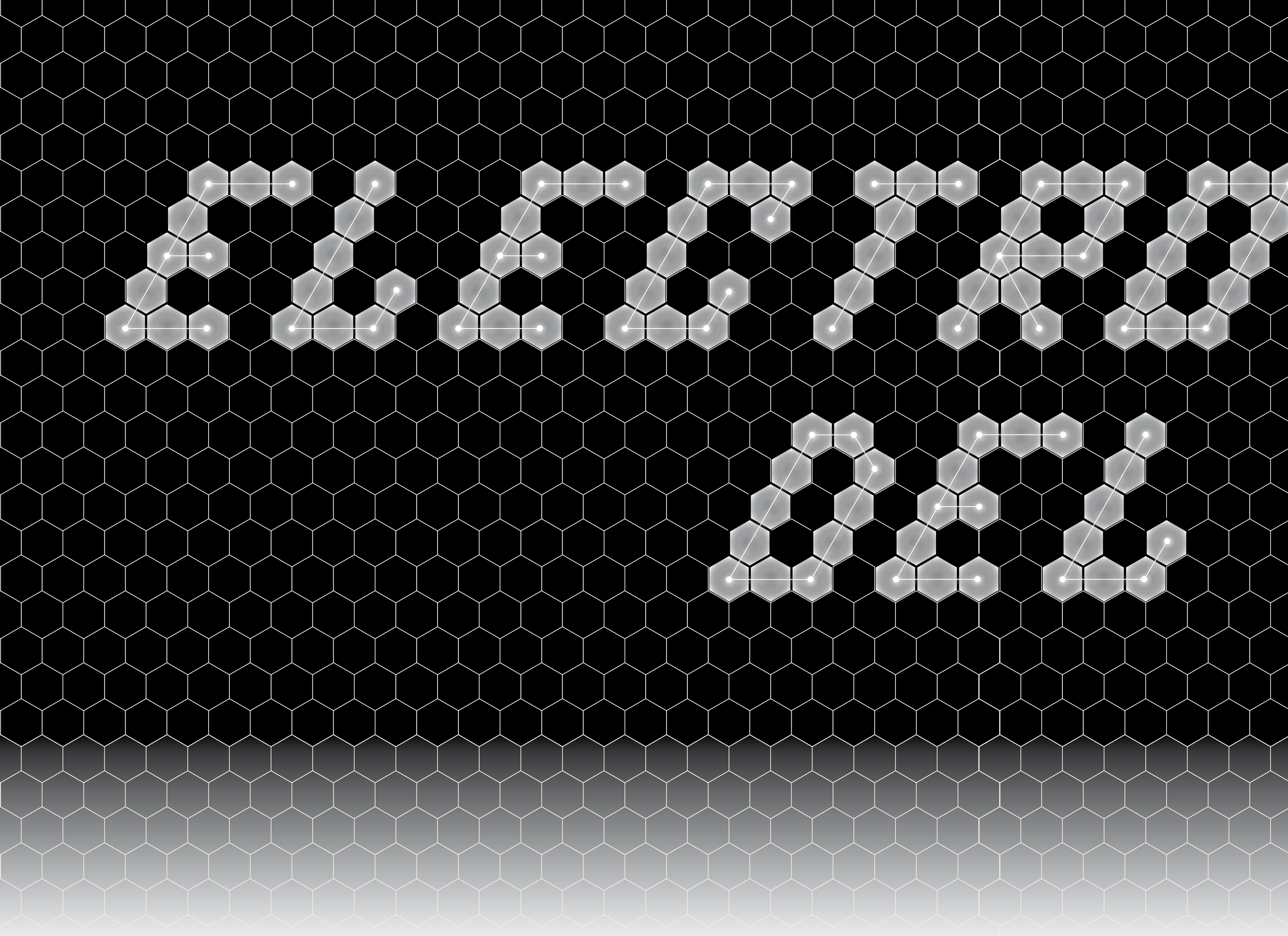
A NEW PRESBYORNITHID BIRD (AVES, ANSERIFORMES) FROM THE LATE CRETACEOUS OF SOUTHERN MONGOLIA. E. N. Kurochkin. G. J. Dyke y A. A. Karhu en *American Museum Novitates*, n.º 3866, págs. 1-12; 27 diciembre, 2002.

SURVIVAL IN THE FIRST HOURS OF THE CENOZOIC. Douglas S. Robertson *et al.* en *Geological Society of America Bulletin*, vol. 116, n.º 5-6, págs. 760-768; mayo, 2004.

DEFINITIVE FOSSIL EVIDENCE FOR THE EXTANT AVIAN RADIATION IN THE CRETACEOUS. Julia A. Clarke *et al.* en *Nature*, vol. 433, págs. 305-308; 20 de enero, 2005.

THE BEGINNINGS OF BIRDS: RECENT DISCOVERIES, ONGOING ARGUMENTS AND NEW DIRECTIONS. Luis M. Chiappe y Gareth J. Dyke en *Major Transitions in Vertebrate Evolution*, dirigido por J. S. Anderson y H.-D. Sues. Indiana University Press, 2007.

THE INNER BIRD: ANATOMY AND EVOLUTION. Gary W. Kaiser. University of British Columbia Press, 2007.



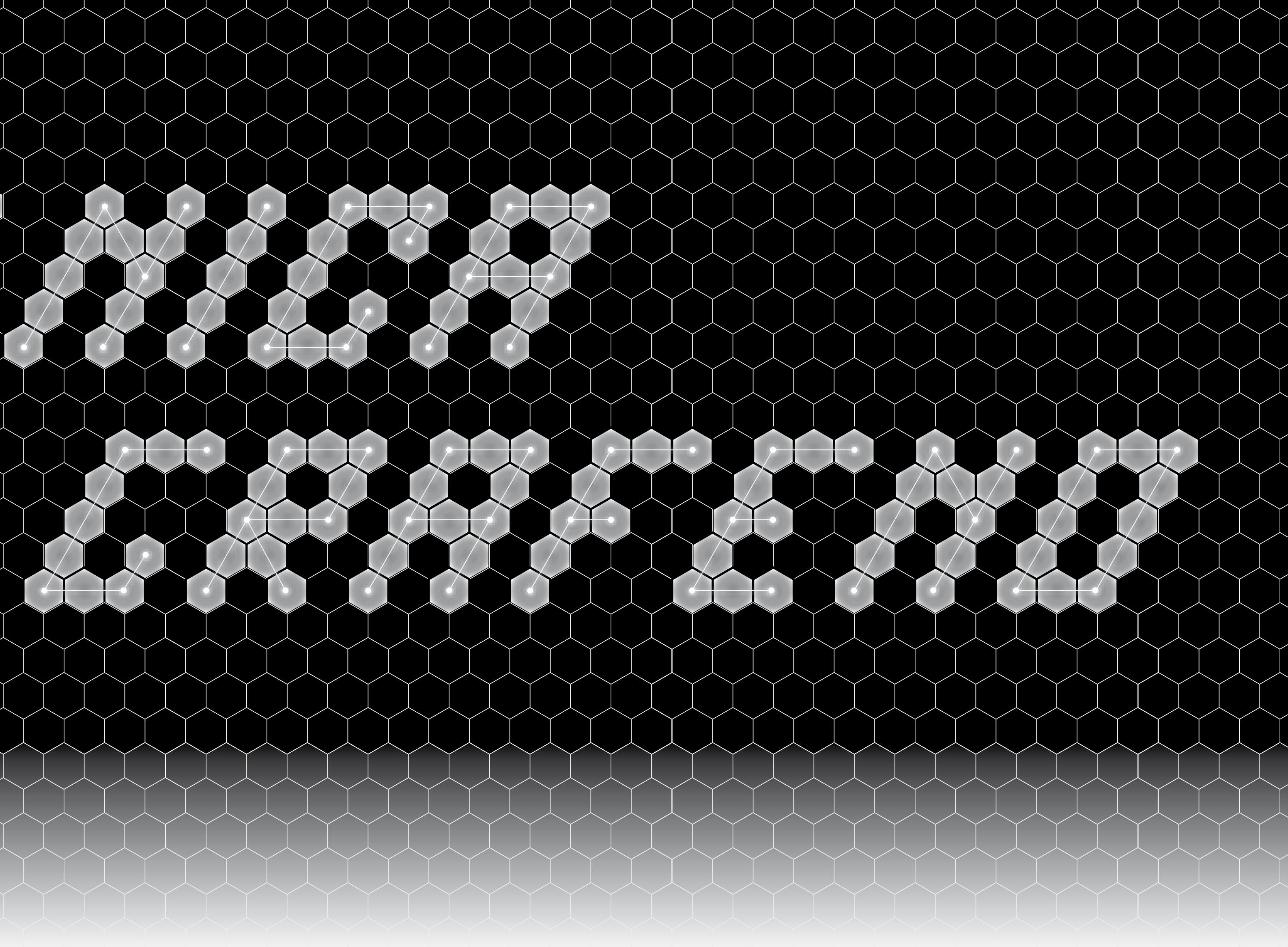
El grafeno, una lámina de carbono cuyo espesor puede ser de un solo átomo, muestra propiedades electrónicas exóticas que revisten un gran interés para la investigación fundamental y el desarrollo de nuevos materiales

José González Carmona,
M.ª Angeles Hernández Vozmediano
y Francisco Guinea

El carbono es el elemento químico más estudiado. Resulta fundamental en biología y medicina, pero también en la producción de energía y la conservación del medio. A través de sus compuestos, forma parte de numerosos materiales de gran importancia en nuestra vida cotidiana. La síntesis del carbono en las estrellas constituye una etapa básica del ciclo por el cual se forman muchos otros átomos.

Durante largo tiempo se consideró que el carbono puro, a temperatura y presión ambientes, existía en forma de dos tipos de materiales: el grafito, que utilizamos en las minas de los lápices, constituido por láminas apiladas fáciles de separar, y el diamante, de estructura cúbica cristalina. Se sabe que el grafito es ligeramente más estable que el diamante. No es frecuente que existan materiales con características muy distintas formados por el mismo elemento químico. Resulta por ello bastante sorprendente que la investigación científica durante el último tercio del siglo XX y los años que llevamos del XXI haya descubierto aún más formas de carbono en la naturaleza.

En los años setenta del siglo pasado se estudiaron los compuestos intercalares de grafito. Constan de láminas muy finas de grafito, que



pueden ser superconductoras, entre capas de otros materiales. También en los setenta se estudiaron de forma intensiva polímeros como el poliacetileno, que puede considerarse una cadena muy larga de átomos de carbono, con algunos enlaces saturados con hidrógeno.

En los años ochenta se descubrió, en el espacio interestelar, el fullereno, una molécula de sesenta átomos de carbono (C_{60}) y con forma de balón de fútbol. Se sintetizaron moléculas de carbono parecidas de mayor tamaño. En los noventa se descubrieron los nanotubos de carbono, láminas muy finas de grafito enrolladas en forma de tubo. Finalmente, a principios del presente siglo, se demostró que podían aislarse y manipularse láminas de grafito con un espesor de un solo átomo: el grafeno.

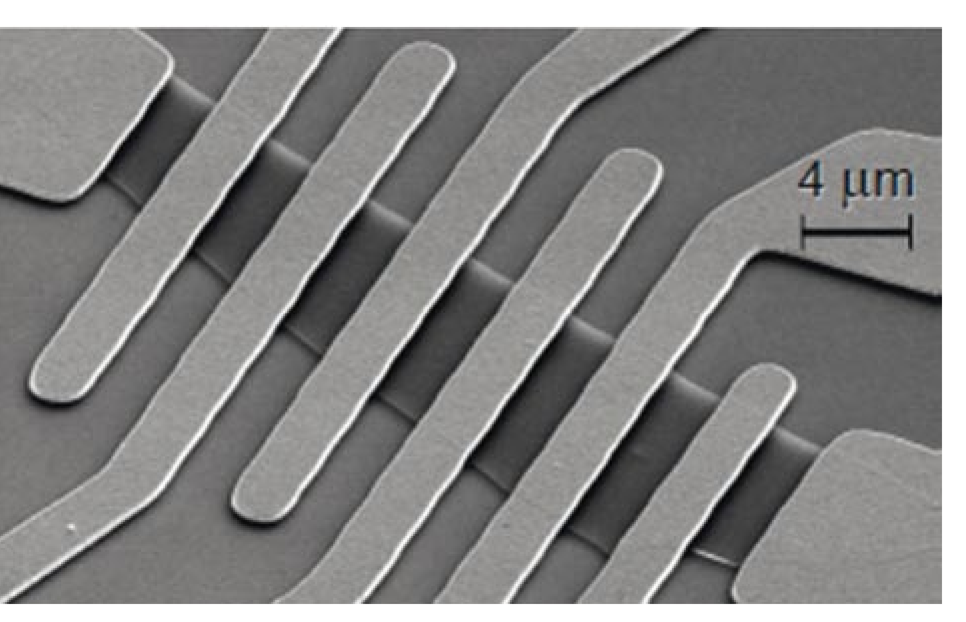
La investigación sobre el grafeno ha protagonizado un auge desbordante desde 2005. En ese año, investigadores de la Universidad de Manchester demostraron que las láminas de grafeno se podían obtener de una forma sencilla. El grupo, dirigido por Andre K. Geim, también caracterizó muestras de distintos espesores, y demostró que el número de portadores de corriente en su interior, electrones o huecos, podía ajustarse mediante electrodos externos [*véase* “Grafeno”, por Andre K. Geim y Philip Kim; Investigación y Ciencia, junio de 2008]. El grafeno puede generarse también en la superficie del carburo de silicio (SiC) por evaporación del silicio, o en la superficie de metales, por descomposición de moléculas absorbidas.

1. EL GRAFENO SE EXPANDE mucho más que cualquier otro material cristalino. La red puede estirarse, de forma reversible, hasta un 10 por ciento.

El único precedente de una actividad investigadora tan intensa e interdisciplinar como la desarrollada en torno al grafeno es el estudio de los superconductores de alta temperatura, iniciado en los años ochenta. El grafeno es el material más bidimensional que pueda imaginarse. Asimismo, se puede variar el número de electrones en su interior. Materiales conductores de espesor reducido constituyen la base de los circuitos electrónicos que hacen funcionar muchos de los dispositivos que utilizamos en nuestra vida cotidiana. Las propiedades de materiales de pequeña dimensión (meso o nanoscópicos) difieren cualitativamen-

CONCEPTOS BASICOS

- El grafeno es el único material constituido por una sola capa de átomos que puede ser sintetizado y estudiado en detalle. Es el objeto más bidimensional que existe.
- Las propiedades electrónicas del grafeno son inusuales y pueden modificarse externamente.
- El estudio de las propiedades exóticas del grafeno ha puesto de manifiesto interesantes relaciones entre los modelos usados en ciencia de materiales y en física teórica. Las nuevas características del grafeno quizá permitan el desarrollo de aplicaciones y dispositivos irrealizables con otros materiales.



2. GRAFENO SUSPENDIDO, contactado por electrodos metálicos. La movilidad de los electrones en esta muestra es comparable a la de los mejores materiales semiconductores utilizados en dispositivos electrónicos.

UNIVERSIDAD DE MANCHESTER (*grafeno suspendido*)

te de las propiedades de átomos y moléculas, y también de los materiales macroscópicos (de escala humana), compuestos por cantidades elevadísimas de átomos.

Finalmente, dado que las leyes de la física cuántica describen por igual el comportamiento de las partículas subatómicas y el movimiento de los electrones en un metal, el grafeno constituye un universo en miniatura, con propiedades que antes se habían estudiado sólo en partículas de gran energía y con velocidades próximas a la de la luz.

Estructura cristalina

El grafeno es el cristal bidimensional más delgado de la naturaleza. Su espesor, de un átomo, hace que no se pueda definir su anchura de una forma inequívoca (se considera de 3 ángstrom, que es la fluctuación observada en medidas de barrido electrónico). La existencia de un cristal bidimensional es un tanto contradictoria: excepto a temperatura cero, los materiales no se encuentran en un estado de perfecto equilibrio; además, las fluctuaciones térmicas en una y dos dimensiones son suficientemente importantes como para que no se pueda definir con rigor el orden cristalino a grandes distancias.

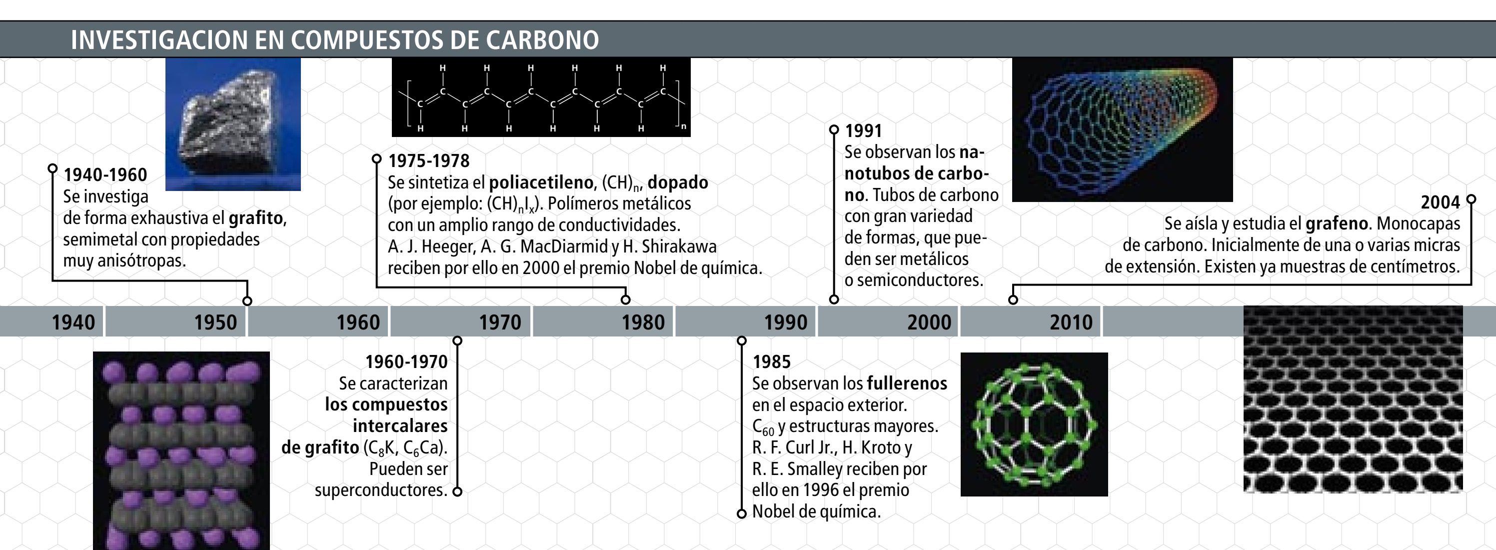
Todo cristal bidimensional presenta defectos, y los más frecuentes son pares de dislocaciones. El grafeno destaca por poseer pocos defectos, una rigidez excepcional y la posibilidad de expandirse mucho más que cualquier otro material cristalino. Se ha demostrado que la red del grafeno puede estirarse, de forma reversible, hasta un diez por ciento. La mayoría de los sólidos dejan de ser estables para deformaciones inferiores al tres por ciento. Las membranas de grafeno pueden soportar átomos de metales pesados, como el oro o el níquel, prácticamente sin deformarse. La masa de estos átomos es cuatro o diez veces mayor que la del carbono. Sin embargo, las muestras de grafeno nunca son completamente planas; presentan rugosidades a escala nanoscópica cuyo origen se desconoce.

Propiedades extrínsecas

El grafeno se puede ver como un objeto que es todo él su superficie. Se halla, por tanto, mucho más expuesto a influencias del medio externo que otros materiales. Los procesos de síntesis y crecimiento, a presión atmosférica y a temperatura ambiente o más elevada, no permiten un control preciso del entorno. Ello puede ser la causa de que las propiedades de conducción del grafeno no lleguen todavía a igualar las de los semiconductores más utilizados en la fabricación de circuitos integrados, obtenidos en salas blancas mediante un proceso finamente controlado (lo que conlleva un gran coste económico).

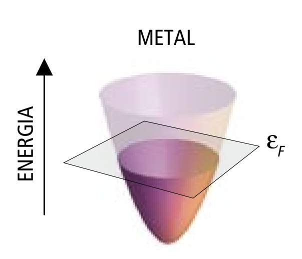
A pesar de la limitada calidad de las primeras muestras, la especial estructura electrónica

INVESTIGACION EN COMPUESTOS DE CARBONO

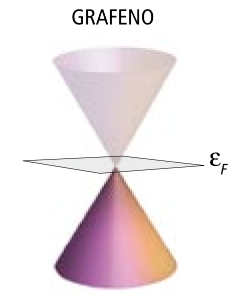


GRAFENO: ENTRE METAL Y SEMICONDUCTOR

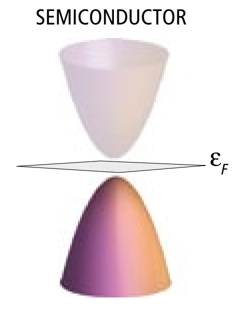
Las propiedades metálicas o aislantes de un material vienen determinadas por la posición del nivel de Fermi (ε_F) y su estructura de bandas electrónicas. El nivel de Fermi corresponde al nivel energético más alto ocupado. Los niveles energéticos desocupados más bajos conforman la banda de conducción (*lila*); los niveles ocupados de mayor energía, la banda de valencia (*fucsia*). En los metales, la banda de conducción y la de valencia se solapan. En los no metales, en cambio, aparece una brecha energética que dificulta el paso de los electrones de una banda a otra. El grafeno es un material fuera de lo común. Sus propiedades electrónicas lo sitúan a caballo entre los metales y los semiconductores.



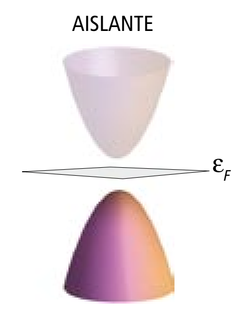
Bandas electrónicas solapadas. No hay brecha energética. Los electrones por debajo del nivel de Fermi pueden saltar a los niveles más cercanos desocupados para establecer una corriente eléctrica.
Un tipo de portador de carga: electrones.



Bandas electrónicas en forma de diábolo: el vértice del cono superior se junta con el del inferior justo en el nivel de Fermi.
No hay brecha energética.
Los electrones pueden pasar fácilmente del cono inferior al superior.
Dos tipos de portadores de carga: electrones y huecos.



Bandas electrónicas separadas por una brecha energética lo bastante pequeña para que los electrones la superen y pasen de la banda de valencia a la de conducción.
Dos tipos de portadores de carga: electrones y huecos.



Bandas electrónicas separadas por una brecha energética demasiado grande para que los electrones pasen a la banda de conducción.
No puede establecerse una corriente eléctrica.

del grafeno ya ha permitido observar procesos como el efecto Hall cuántico, de gran interés desde el punto de vista de la investigación fundamental, así como por sus posibles aplicaciones. Este efecto se ha medido en grafeno a temperatura ambiente (hasta ahora, su observación en silicio o germanio exigía enfriar las muestras a la temperatura del helio líquido, 4 ºK).

La actividad investigadora para separar las propiedades intrínsecas del grafeno de las inducidas por el medio y mejorar la calidad del material es muy intensa. La situación cambia prácticamente de mes en mes. Se ha pasado de las escasas muestras iniciales de dimensiones de milésimas de milímetro a capas de centímetros. La movilidad de los portadores de corriente ha aumentado en más de dos órdenes de magnitud; para ello se han aplicado técnicas de expulsión de contaminantes de las muestras y se ha experimentado con muestras suspendidas que minimizan el contacto con otras partes del dispositivo (*véase la figura 2*). En octubre de 2009 se publicó que el grafeno presentaba uno de los estados más exóticos de la materia: el efecto Hall cuántico fraccional.

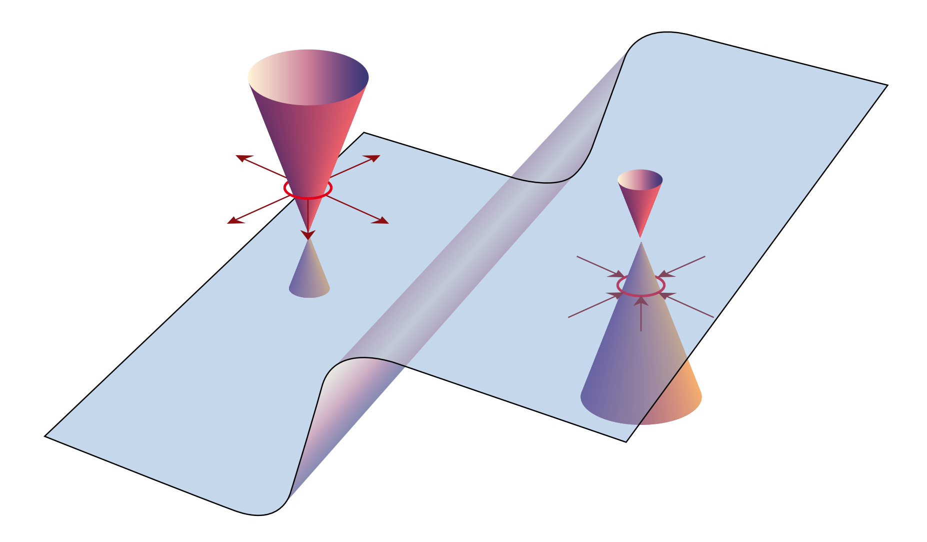
Propiedades electrónicas

Los materiales se clasifican en metálicos y aislantes, según los electrones en su interior puedan desplazarse mediante campos eléctricos o no. Esta clasificación constituyó uno de los primeros éxitos de la aplicación de la mecánica cuántica al estudio de los sólidos. La naturaleza ondulatoria de los electrones induce su difracción por la red cristalina; ello genera regiones prohibidas de energía (brechas), en las que los electrones no se pueden propagar. Sólo cuando la brecha de energía no es excesivamente grande (del orden de 1 electronvolt), ésta puede superarse bajo ciertas condiciones, lo que caracteriza a los materiales semiconductores (*véase el recuadro* "Grafeno, entre metal y semiconductor").

El grafeno es un material fuera de lo común. Sus propiedades electrónicas lo sitúan a caballo entre el conjunto de los metales y el de los semiconductores. ¿Puede existir una situación intermedia entre tener o no el nivel de Fermi (nivel energético más alto ocupado) en la brecha que separa las bandas de energía? La respuesta a esta pregunta se encuentra en la sorprendente forma de las bandas del grafeno: en las proximidades del nivel de Fermi, el valle de la banda desocupada de menor energía (banda de conducción) se halla pegado en un solo punto a la cima de la banda ocupada de mayor energía (banda de valencia).

Más sorprendente si cabe es la forma de diábolo que presentan las dos bandas del gra-

JOSE GONZALEZ CARMONA, M.ª ANGELES HERNANDEZ VOZMEDIANO Y FRANCISCO GUINEA



3. ESTADOS ELECTRONICOS del grafeno a los dos lados de una barrera energética. A la izquierda, los portadores de carga son electrones; a la derecha, huecos. La propagación de los portadores conserva la dirección de los pseudoespines (*flechas*). El electrón que incide sobre la barrera continúa al otro lado en forma de hueco; la probabilidad de que sea reflejado es nula.

feno, juntándose el vértice del cono superior con el del cono inferior justo en el nivel de Fermi. La singularidad cónica puede representarse por una dependencia de la energía E en función del momento $\vec{p}$ del electrón dada por $E(\vec{p}) = \pm v|\vec{p}|$, siendo el módulo del momento en dos dimensiones $|\vec{p}| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$.

Así, el grafeno parece participar de lo mejor de los dos mundos: el de los metales y el de los semiconductores. Con los metales, el grafeno tiene en común que la brecha energética entre la banda de valencia y la de conducción es nula; ello facilita el paso de los electrones desde el cono inferior, por debajo del nivel de Fermi, al cono superior. Con los semiconductores, que cuenta con dos tipos de portadores de carga: electrones y huecos. Puede generarse una corriente de electrones (cargas negativas) mediante la ocupación del "valle" del cono superior, o bien una corriente de huecos (cargas positivas) mediante el vaciado de los niveles más energéticos del cono inferior.

Las propiedades exóticas de las bandas de energía del grafeno se hallan en el origen de las posibles aplicaciones técnicas de este material y lo convierten en un excelente banco de pruebas para la investigación de fenómenos físicos fundamentales.

En los metales, los portadores de carga muestran en su movimiento cierta inercia, que se caracteriza por una masa efectiva (distinta de la masa real del electrón en el vacío). Dicha inercia procede de una interacción compleja con los campos electrostáticos de la red cristalina. La relación lineal de dispersión, $E(\vec{p}) = \pm v|\vec{p}|$ de las bandas electrónicas del grafeno implica que la masa efectiva de los portadores de carga es cero. En un sistema ideal, donde los portadores no puedan ser obstaculizados por impurezas u otras fuentes de difusión, la velocidad de los mismos debería mantenerse invariable y fijada por la constante de proporcionalidad v (que toma en el grafeno un valor considerable del orden de 10^6 m/s).

Pero no se acaban ahí las propiedades notables del grafeno. La relación lineal entre la energía y el momento de los electrones conduce a consecuencias de mayor alcance desde el punto de vista de la física fundamental. La ley $E(\vec{p}) = \pm v|\vec{p}|$ introduce propiedades "relativistas" en el movimiento de los electrones del grafeno, del mismo modo que el principio de la relatividad de Einstein habla de la equivalencia entre las variables de espacio y tiempo. Según este principio, en las ecuaciones relativistas, cualquier dependencia funcional en la distancia espacial, x^2, debe ir acompañada de un término similar dependiente del intervalo de tiempo c^2t^2, siendo c la velocidad de la luz. En la mecánica cuántica, el momento constituye la variable conjugada del espacio, mientras que la energía corresponde a la variable conjugada del tiempo. En la dinámica de los electrones en el grafeno, la dependencia

4. DIFRACCION DE LOS ELECTRONES del grafeno por una doble rendija. Hay dos tipos de electrones, que provienen de puntos diferentes en la zona de Brillouin cristalina, el espacio de posibles momentos en la red. La existencia del pseudoespín hace que la figura de difracción formada por uno de ellos esté ligeramente desplazada hacia la parte superior, mientras que la de la otra se desplaza hacia abajo. Las franjas de interferencia de electrones sin pseudoespín estarían distribuidas simétricamente respecto a las dos rendijas.

JOSE GONZALEZ CARMONA, M.ª ANGELES HERNANDEZ VOZMEDIANO Y FRANCISCO GUINEA

en E^2 es equivalente a la dependencia en v^2p^2. Las ecuaciones que rigen el movimiento de los portadores de carga adquieren entonces, aunque sea sólo de manera formal, la misma simetría que existe en la teoría de la relatividad, con la salvedad de que la velocidad de la luz que aparece en ella es aquí sustituida por la velocidad de Fermi, v.

El grafeno posee numerosas propiedades especiales, que no son frecuentes en otros sólidos cristalinos. Su comprensión requiere ahondar en el estudio de los efectos de la mecánica cuántica en sistemas complejos, que ofrecen paralelismos inesperados entre problemas aparentemente distintos. Ofrecemos a continuación una breve descripción de algunas de estas propiedades exóticas.

Pseudoespín

La red del grafeno está formada por la repetición de un patrón unidad que contiene dos átomos de carbono equivalentes. Puede considerarse la unión de dos redes monoatómicas triangulares, de modo que los estados (funciones de onda) de los electrones corresponden a superposiciones de estados definidos en cada una de estas dos redes. La fase relativa entre estas dos componentes permite definir una variable, el pseudoespín, con propiedades análogas a las del espín de un electrón en el vacío.

Una propiedad muy importante del pseudoespín es que su proyección sobre la dirección del movimiento de cada portador de carga debe mantenerse invariable a lo largo del tiempo. El signo de esta proyección (helicidad) puede ser positivo (cuando el pseudoespín posee la misma orientación que el momento $\vec{p}$) o negativo (cuando las orientaciones son opuestas), por lo que el enunciado anterior viene a decir que la helicidad no puede pasar de positiva a negativa a lo largo de la trayectoria de un electrón, o de un hueco. Ello hace que los portadores de carga no puedan dar marcha atrás en el grafeno, pues la inversión del sentido del movimiento implicaría una inversión de la helicidad, que no está permitida por la ecuación que descubre el movimiento de los electrones. El rebote de los portadores de carga sólo es posible en caso de colisión con impurezas o defectos particulares de la red, que puedan dar un impulso tan grande al electrón como para llevarle más allá de los conos de valencia y conducción.

La existencia del pseudoespín implica que las barreras de potencial que se utilizan para localizar los portadores en semiconductores, y fabricar transistores u otros dispositivos, no pueden confinar los electrones en el grafeno (la paradoja de Klein, que también existe en la física relativista, *véase la figura 3*). Ello hace que el pseudoespín no sólo revista interés para la investigación fundamental: su existencia complica el diseño de los dispositivos electrónicos de grafeno.

La diferencia entre electrones ordinarios y electrones con pseudoespín podría observarse en uno de los experimentos más conocidos de la mecánica cuántica, la difracción de una partícula que cruza una barrera por una doble rendija (*véase la figura 4*).

Interacciones complejas

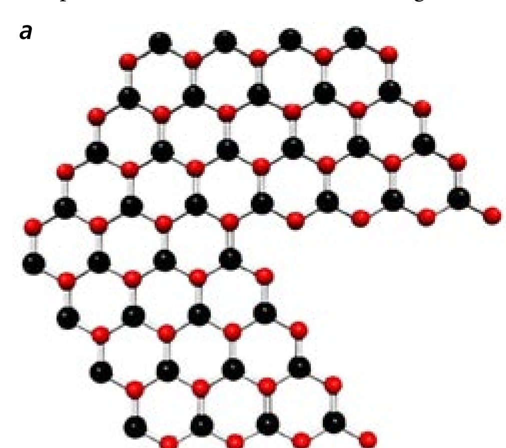
Una carga eléctrica en un metal está apantallada por los electrones del metal. Por ello, las interacciones entre los propios electrones no

BANDA DE CONDUCCION

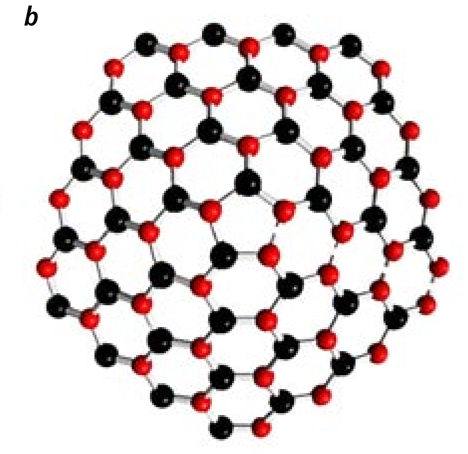
BANDA DE VALENCIA

5. LA INTERACCION ENTRE LOS ELECTRONES del grafeno modifica las bandas electrónicas, que se reducen (*cono interno*). A energías bajas, la velocidad de los electrones es mayor; ello conlleva una reducción del número de estados y aproxima el comportamiento del grafeno al de un material aislante (si bien no llega a existir una brecha prohibida de energías). Con todo, la velocidad de los electrones no puede aumentar indefinidamente, por mucho que se reduzca la energía, puesto que nunca podrá exceder la velocidad de la luz en el vacío.

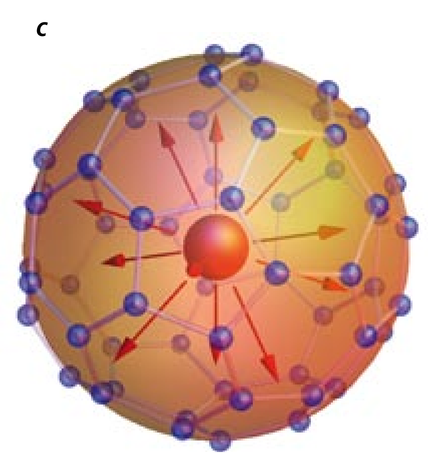
a



b

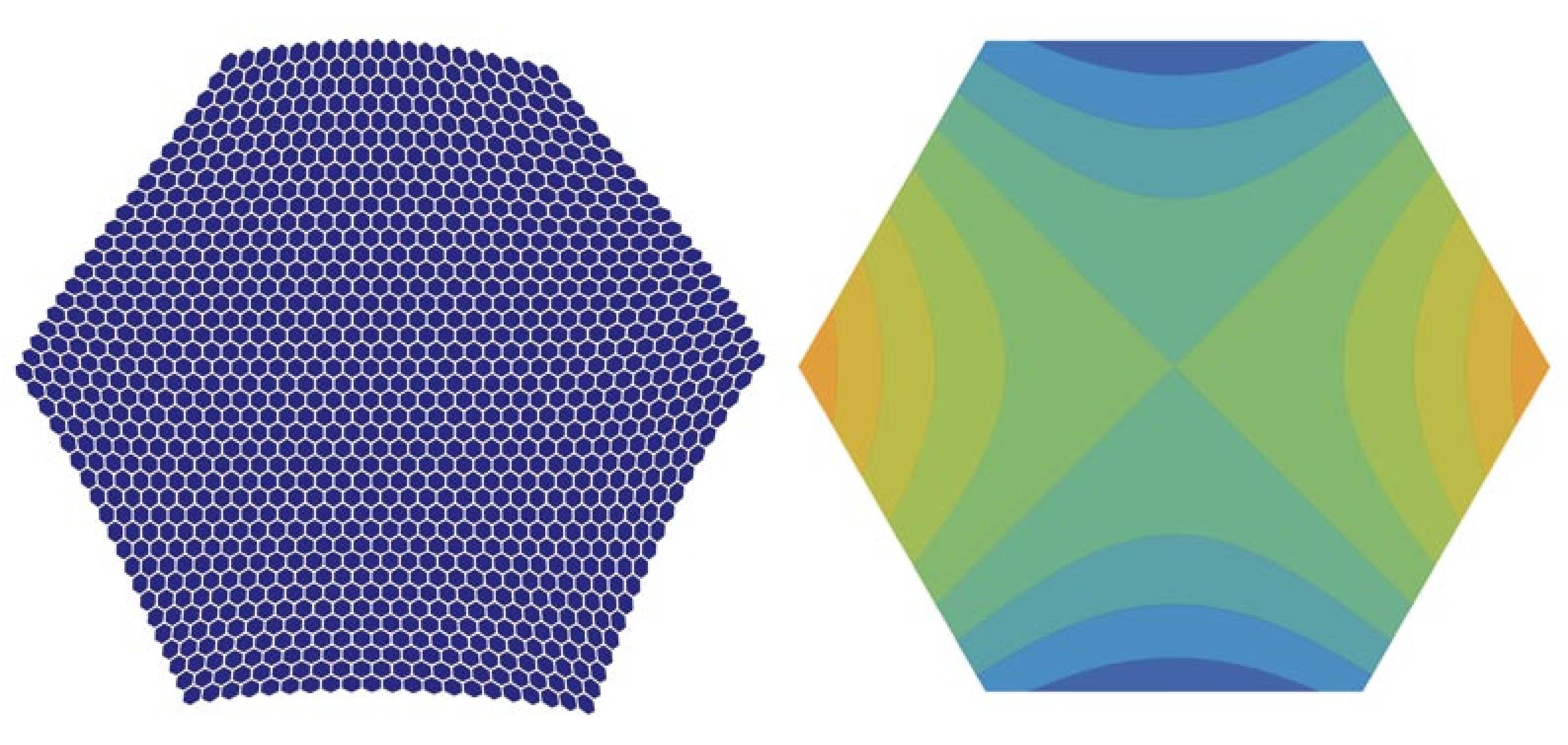


c



JOSE GONZALEZ CARMONA, M.ª ANGELES HERNANDEZ VOZMEDIANO Y FRANCISCO GUINEA

6. UN PENTAGONO EN LA RED HEXAGONAL del grafeno constituye un defecto (disclinación). Para obtenerlo, basta con eliminar de la red un sector de 60 grados (*a*) y pegar los bordes restantes (*b*). Ello implica distinguir los átomos que ocupan una de las subredes (*rojos*) de los que forman la otra (*negros*). Un electrón que recorre una trayectoria cerrada que incluye el defecto debe invertir el pseudoespín. Los doce pentágonos que existen en un fullereno implican que los estados electrónicos se pueden describir como los obtenidos de la ecuación de Dirac en una superficie esférica con un monopolo magnético en su interior (*c*).



7. LAS DEFORMACIONES DE LA RED de grafeno (*izquierda*) generan un campo magnético efectivo (*derecha*) debido a las tensiones internas.

JOSE GONZALEZ CARMONA, M.ª ANGELES HERNANDEZ VOZMEDIANO Y FRANCISCO GUINEA

cambian cualitativamente los estados electrónicos, que pueden estimarse, en una primera aproximación, sin tener en cuenta el efecto de las interacciones. Esto no ocurre en los materiales aislantes. En éstos, sin embargo, la existencia de una brecha de energías prohibidas en el espectro de estados electrónicos también permite ignorar el efecto de la repulsión entre los electrones, que, en todo caso, haría al material más aislante todavía.

Como se mencionó más arriba, el grafeno no pertenece a ninguna de esas clases de materiales. No es un metal. Tampoco un aislante. La estructura de las bandas no permite a los electrones apantallar del todo potenciales electrostáticos. Como resultado, los estados se modifican, y las propiedades de apantallamiento también. Ello hace que los electrones dentro del grafeno interaccionen de manera parecida a como lo hacen los electrones de la física de altas energías. En particular, el largo alcance de la interacción sin apantallar da lugar a problemas técnicos de cálculo (el valor aparente de algunas cantidades es infinito).

Ese problema de cálculo apareció por primera vez en mecánica cuántica cuando se intentaron incluir los campos electromagnéticos en la teoría de partículas elementales. La coincidencia con el grafeno no es casual. Los electrones del grafeno poseen propiedades análogas a los electrones de alta energía en el vacío, salvo que su velocidad es dos órdenes de magnitud menor que la velocidad de la luz. Un tratamiento completo del efecto de las interacciones en el grafeno requiere los mismos métodos y conceptos que se utilizan en electrodinámica cuántica (la teoría cuántica de partículas cargadas). Nos referimos a la renormalización, un conjunto de técnicas que permiten la descripción de sistemas físicos "divergentes" mediante la redefinición de los parámetros de la teoría en función de la escala de energía del sistema. En el caso del grafeno, ello significa que la estructura de bandas y la velocidad de los electrones dependen de la energía a la que se miden (*véase la figura 5*).

La importancia de los efectos de renormalización está determinada por el valor, a baja energía, de la constante de estructura fina (variable adimensional), el cociente entre la carga del electrón al cuadrado y la constante de Planck multiplicada por la velocidad de la luz: $\alpha = e^2/(\hbar c) \approx 1/137$. La variable análoga en el grafeno se obtiene mediante la sustitución de la velocidad de la luz por la velocidad de los electrones, y la inclusión, en la definición de la carga del electrón, del apantallamiento debido a efectos externos.

Campos de aforo

En física cuántica, un campo de aforo (*gauge*) modifica las propiedades de las partículas cuando éstas se desplazan. Una partícula que sigue una trayectoria dada, en presencia de un campo de aforo, cambia su estado interno. Ello puede dar lugar a fuerzas adicionales y modificar, a su vez, la trayectoria. El caso más conocido es el campo electromagnéti-

Los autores

José González Carmona, M.ª Angeles Hernández Vozmediano y **Francisco Guinea** son investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Guinea y H. Vozmediano trabajan en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid; González, en el Instituto de Estructura de la Materia. Desarrollan modelos para entender las propiedades de sistemas con un gran número de grados de libertad que interaccionan entre sí. Los compuestos de carbono, como el grafeno, constituyen un ejemplo muy interesante de este tipo de objetos.

co, que altera la fase de la función de onda de la partícula. Este cambio de fase modifica las interferencias entre los caminos que una partícula cuántica puede tomar, dando lugar a efectos que permiten medir la naturaleza ondulatoria de los electrones. Las interacciones fundamentales de la naturaleza, con la posible excepción de la gravedad, admiten una descripción en términos de campos de aforo que cada partícula induce a su alrededor, afectando a las demás.

Un ejemplo donde campos de aforo efectivos resultan útiles para describir las propiedades del grafeno es la dinámica de los electrones alrededor de ciertos defectos de la red, como el inducido por la sustitución de un hexágono por un pentágono. Un electrón que sigue una trayectoria muy alejada del pentágono ve un entorno local casi idéntico al grafeno perfecto: cada átomo de carbono está rodeado por tres primeros vecinos. La existencia de un pentágono requiere que las dos subredes que forman la red cristalina se intercambien a lo largo de una dirección dada (*véase la figura 6*). Como se mencionó más arriba, la fase relativa de las funciones de onda del electrón en cada una de las subredes determina el pseudoespín. Como resultado, el pseudoespín de un electrón que se mueve alrededor del pentágono se invierte.

Este efecto es el mismo que el que produciría un campo de aforo que actuase sobre el electrón. En particular, la dinámica de un electrón en un fullereno, cuya red contiene doce pentágonos (como un balón de fútbol), se mueve de una forma muy parecida a la de una partícula relativista sobre la superficie de una esfera con un monopolo magnético en su interior.

El movimiento de los electrones en el grafeno también se ve afectado por las deformaciones de largo alcance de la red cristalina. Este efecto se puede describir como un campo de aforo. Debido a la naturaleza "relativista" de los electrones del grafeno, una deformación de la red cristalina modifica el momento lineal de la partícula; el mismo efecto que produce un cambio en la fase de la función de onda. Esta propiedad, que se ha estudiado sólo en el grafeno, hace que determinadas deformaciones generen los mismos efectos que campos magnéticos reales (*véase la figura 7*), si bien siempre aparecen dos tipos de campos, de signos opuestos.

Además de su interés desde un punto de vista fundamental, se están desarrollando aplicaciones que permitan controlar las propiedades electrónicas del grafeno. De ello se encarga la "ingeniería de tensiones" (*strain engineering*).

Bibliografía complementaria

DRAWING CONCLUSIONS FROM GRAPHENE. Antonio Castro Neto, Francisco Guinea y Nuno Miguel Peres en *Physics World*, vol. 19, págs. 33-37; noviembre de 2006.

THE ELECTRONIC PROPERTIES OF GRAPHENE. A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov y A. K. Geim en *Reviews of Modern Physics*, vol. 81, págs. 109-162; enero de 2009.

GRAPHENE, STATUS AND PROSPECTS. Andre K. Geim en *Science*, vol. 324, pág. 1530; 2009.

Desarrollo embrionario y evolución

Un amplio espectro de factores, genéticos y físicos, de localización y cronológicos, impone límites a los rasgos de un animal o amplifica los cambios

Katherine E. Willmore



CONCEPTOS BASICOS

- A pesar de la enorme diversidad de caracteres en las distintas especies animales, algunos rasgos permanecen invariables. Los principales planes corporales se originaron en el Cámbrico, y desde entonces no ha aparecido ninguno nuevo.
- El desarrollo embrionario ejerce una notable influencia en la evolución de las diversas formas naturales. Los procesos del desarrollo imponen límites y determinan la invariabilidad de ciertos rasgos.
- Los sistemas de desarrollo presentan una naturaleza conservadora. Sin embargo, determinados fenómenos, como la heterocronía, la heterotopía o la canalización, permiten la aparición de nuevas estructuras y favorecen el cambio evolutivo.



1. RASGOS ESPECIFICOS QUE DISTINGUEN A LOS ANIMALES. Entre las aves, los picos adoptan una amplia variedad de formas y tamaños. La garza paleta (*izquierda*) posee un pico largo, plano y ancho; el pico del alcaraván es largo y delgado (*arriba, izquierda*), y el cálao terrícola (*arriba, derecha*) tiene un pico robusto, largo y alto. Mediante la biología evolutiva del desarrollo, los científicos exploran las restricciones en la formación de los rasgos animales, como los picos de las aves, así como su historia evolutiva.

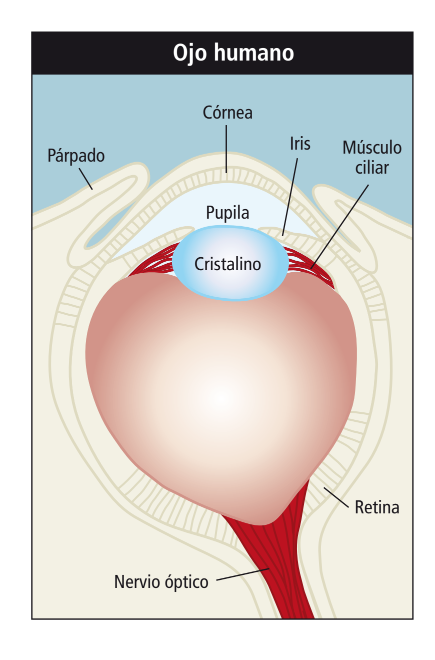
BIOSPHOTO/MAFART-RENODIER ALAIN/PETER ARNOLD (*página izquierda*); JOHN CANCALOSI/PETER ARNOLD (*arriba*)/*American Scientist*

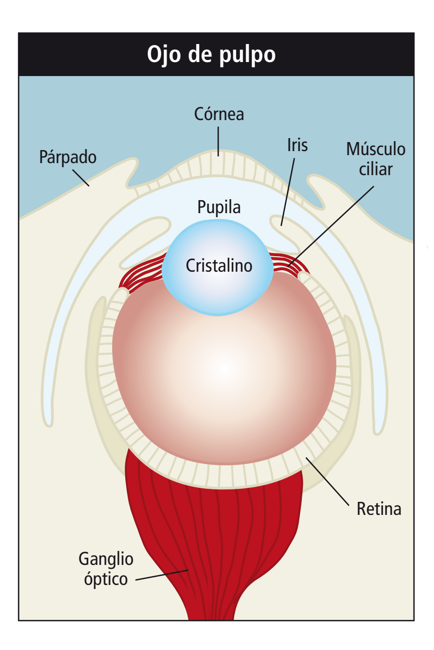
En el reino animal, existen rasgos específicos que distinguen a un grupo de animales de otro. El pico y las plumas separan a las aves de los mamíferos y los anfibios. Existen incluso variantes de esas características que permiten diferenciar una clase de aves de otras: los patos poseen un pico largo, ancho y plano, mientras que los gansos lo tienen más corto, delgado y alto. Sin embargo, las aves comparten con algunos mamíferos y anfibios un gran número de caracteres, como los ojos, los pies, las piernas, la cola, etcétera. ¿A qué se debe la variación tan profunda de unos caracteres, en tanto que otros permanecen relativamente iguales en un amplio espectro de animales?

El hecho de compartir una misma historia evolutiva podría explicar las semejanzas, mientras que las diferencias representarían una respuesta adaptativa a las fuerzas selectivas. Esta interpretación no basta para dar cuenta de toda la variación existente en la naturaleza. En diferentes linajes de animales pueden surgir caracteres similares gracias a la *evolución convergente*.

Muchos biólogos ponen como ejemplo de evolución convergente el desarrollo del ojo en el ser humano y en el pulpo. Ambos ojos están constituidos por párpados, iris, cristalino, pupila y retina, pero esas estructuras se forman mediante mecanismos distintos. El ojo humano se desarrolla a partir de una evaginación del cerebro, mientras que el ojo del pulpo lo hace a partir de una invaginación de la piel. Ambos ojos difieren también desde un punto de vista funcional. Los nuestros procesan la luz a través de las células de la retina situadas en el fondo del ojo, los conos y los bastones; en el pulpo, esas células ocupan una posición anterior. Además, la distancia focal del cristalino en el pulpo se mantiene fija, de modo que el ojo enfoca moviendo todo el cristalino respecto a la retina. En los humanos, el enfoque de los objetos situados a diferentes distancias del ojo se consigue mediante la modificación de la forma del cristalino.

El ejemplo del ojo muestra los importantes conocimientos que se adquirieren en el campo de la biología evolutiva del desarrollo o la *evo-devo*. La evo-devo estudia la interacción entre los procesos del desarrollo y las fuerzas selectivas que dan origen al cambio evolutivo. En este contexto, nos referimos al desarrollo como a la formación de los rasgos físicos y los sistemas fisiológicos desde el momento de la concepción. La evo-devo pretende establecer el grado de constricción o sesgo de los procesos del desarrollo y valorar el modo en que éste repercute en la evolución. A pesar del gran número de modificaciones evolutivas potenciales, no todas prosperarán por igual. Algunas características no se generan en ciertos anima-





2. LA EVOLUCION CONVERGENTE se observa en el ojo de los humanos y de los pulpos, donde estructuras similares surgen de procesos de desarrollo distintos. Como se aprecia en la figura, los ojos de animales muy distintos se componen de estructuras muy parecidas: córnea, cristalino, retina, etcétera. Esta semejanza resulta aún más llamativa debido a que el ojo humano y el del pulpo se desarrollan a partir de vías completamente diferentes.

les porque carecen del conjunto adecuado de herramientas de desarrollo. Podemos comparar ese conjunto con las piezas LEGO, pues ambos determinan el tipo de estructuras que se puede construir. Con un conjunto estándar de piezas rectangulares LEGO se crean múltiples estructuras únicas, aunque ninguna de ellas presentará los bordes redondeados. De la misma manera, el repertorio de procesos, rutas e interacciones posibles durante el desarrollo de un organismo es limitado.

El presente artículo destaca la influencia del desarrollo en la evolución de las diversas formas naturales, y revela el conjunto de reglas que delimitan la dirección del cambio evolutivo. Esas reglas contribuyen a desmitificar la complejidad de formas que crea la naturaleza.

Treinta y cinco formas generan toda la diversidad

Hace 500 millones de años, durante el período Cámbrico, se originaron las 35 formas o planes corporales en los que se amoldan todos los animales. La aparición de las formas se dio con relativa rapidez en la escala del tiempo evolutivo: sucedió en un período de entre 5 y 10 millones de años.

Muchas de las semejanzas observadas entre los diferentes tipos de animales se pueden explicar sobre la base de un plan corporal común. Tomemos el caso de los cordados (phylum Chordata), al que pertenecen los humanos. En algún momento del desarrollo, todos los miembros del filo presentan cuatro características comunes: una serie de aberturas que conecta el exterior con el interior de la garganta; un haz de fibras nerviosas que recorre el dorso, comunicando el cerebro con otras estructuras; una cola postanal; y un tubo cartilaginoso que sostiene la cuerda neural. Los humanos comparten estas características físicas con los anfibios, las aves, los peces e incluso las ascidias.

Aunque hayan transcurrido millones de años, diez veces más de lo que duró la explosión del Cámbrico, no ha aparecido desde entonces ningún plan corporal nuevo. Incluso a pesar de los importantes cambios acaecidos, como los que permitieron el paso de la vida acuática a la terrestre. Los procesos del desarrollo podrían limitar, pues, la aparición de nuevos planes corporales.

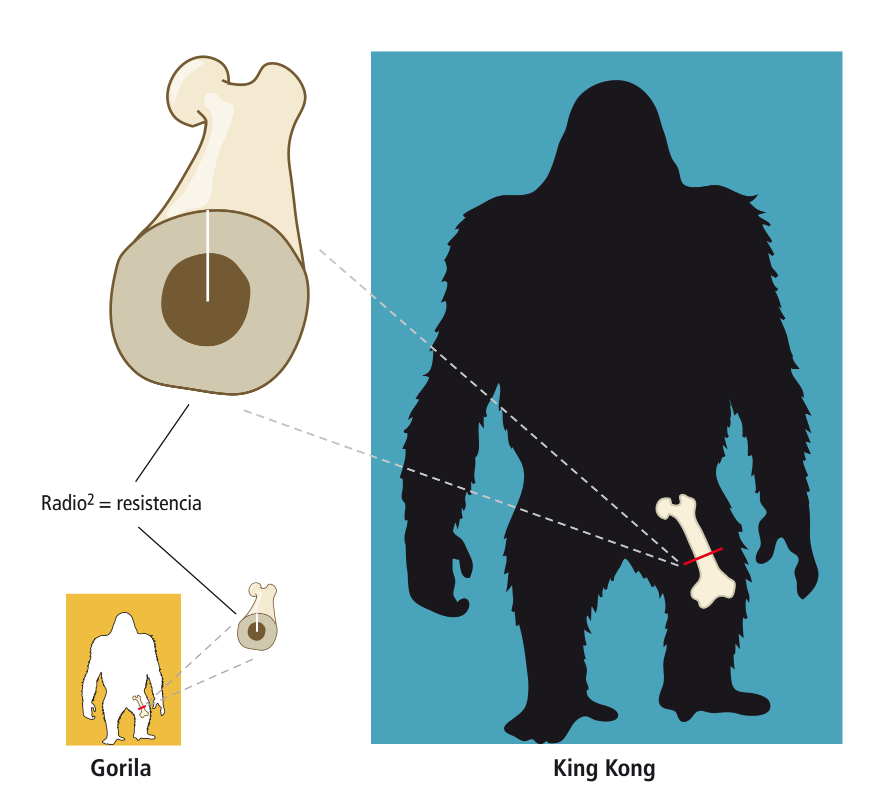
Las limitaciones estructurales hacen inviables determinadas formas. Considérese el King Kong de ficción como una versión a gran escala de un gorila, con sus mismas proporciones pero con un tamaño total mucho mayor. En los animales reales, sobre todo en los terrestres, las propiedades estructurales de los huesos restringen el tamaño y las proporciones del organismo. Una sencilla explicación matemática basada en el fémur, el hueso del muslo, demuestra la imposible existencia de King Kong.

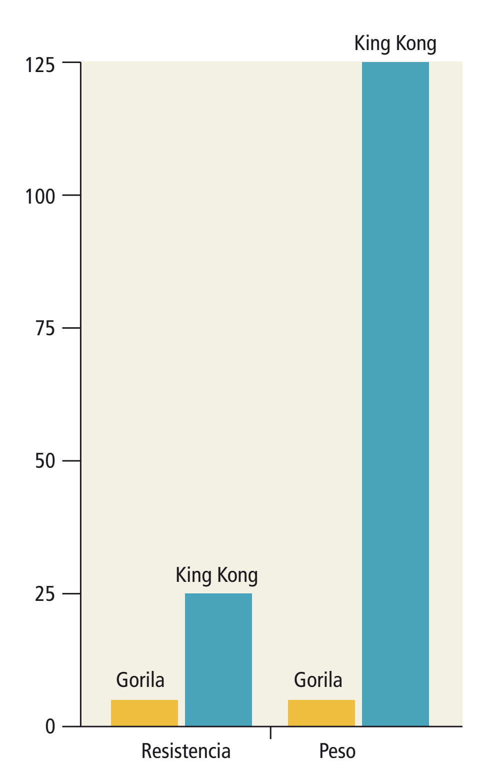
Imaginemos que la altura del gorila de ficción quintuplica la de un gorila normal. La resistencia de un hueso depende del área de su sección transversal, es decir, del cuadrado de su radio. Si todas las dimensiones del fémur de King Kong se multiplican por cinco, incluido su radio, la resistencia de ese hueso ascenderá a 5^2, es decir, será 25 veces mayor. Por otro lado, el volumen de King Kong aumentará según el producto de la longitud por el área de su sección transversal, o sea, 5 por 25; el volumen será, pues, 125 veces superior. Un peso que aumentara cinco veces más que la resistencia de sus huesos aplastaría las piernas de ese gorila gigante. La discrepancia entre la resistencia y el peso también se podría aplicar al resto del cuerpo de King Kong. De manera que los simios podrían aumentar de tamaño, pero los factores estructurales imponen límites.

Restricciones

Más allá de la física existen otros elementos, como la organización del genoma, que dirigen el desarrollo. En gran variedad de animales, se pueden descubrir ciertos genes y familias génicas que cumplen funciones equivalentes. Cabe mencionar un conjunto bien estudiado de esos *genes conservados*, los genes Hox, identificados en un amplio espectro de animales (ranas, moscas, ratones, humanos y gusanos). Los genes Hox ayudan a establecer el plan corporal básico de un animal, determinando el orden en que se disponen las diferentes





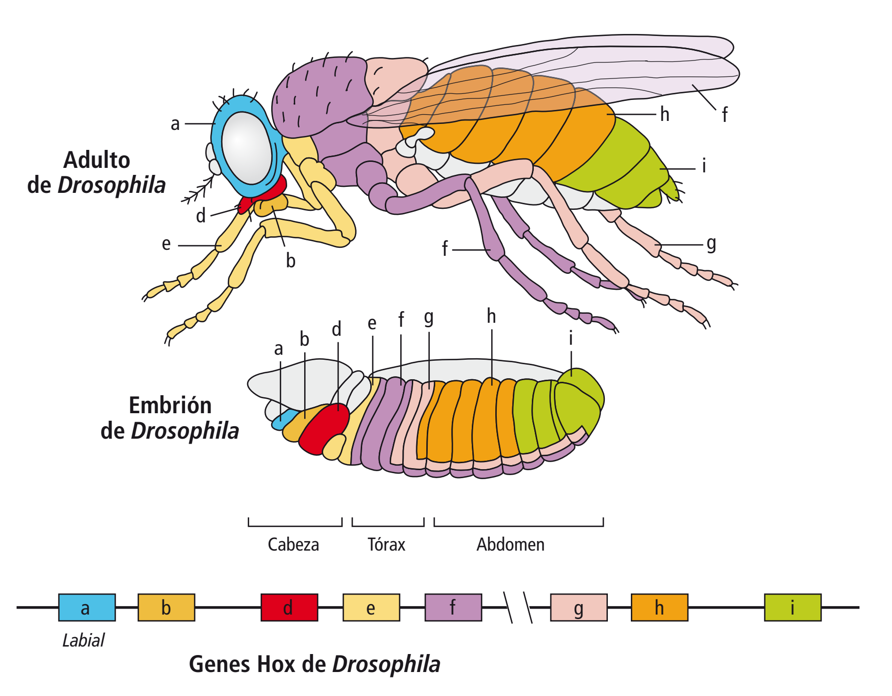


3. LAS LIMITACIONES FISICAS hacen imposible la existencia de King Kong. Imaginemos que el tamaño de King Kong (*cuadro azul*) supera en cinco veces el de un gorila normal (*cuadro amarillo*), pero sus proporciones se mantienen. Consideremos sólo el fémur de King Kong. Como el resto del animal, el tamaño de su fémur (*izquierda*) quintuplica el de un gorila ordinario. La resistencia de un hueso depende del área transversal, que en King Kong aumenta por 5^2, es decir, 25. Por su parte, el peso se multiplica por el producto del tamaño y el área transversal, o sea, por $5 \times 25 = 125$. En consecuencia, si el peso de King Kong aumenta cinco veces más que su resistencia, su propio peso lo aplastaría (*derecha*).

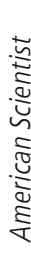
estructuras desde la cabeza hasta la cola. Más aún, el orden físico de los genes Hox en los cromosomas se corresponde con el de las estructuras corporales que los mismos especifican; al principio se hallan los genes relativos a la cabeza, seguidos de los genes del tórax y, por último, los del abdomen. El orden cronológico de la expresión de esos genes coincide también con su disposición en el cromosoma: primero se expresan los de la cabeza, luego los del tórax y, por último, los del abdomen.

El equipo de Beat Lutz, de la Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia, demostraron la conservación funcional y espacial de los genes Hox en la mosca de la fruta y en la gallina. Investigaron el gen *labial*, necesario para el correcto desarrollo de la cabeza. Cuando ese gen no se expresa, las moscas mueren en el estadio de embrión; pero si se introducía el gen *labial* en el lugar adecuado dentro del genoma del embrión y en un momento específico del desarrollo, los embriones sobrevivían. Más sorprendente aún, al insertar una versión del gen *labial* de la gallina en el genoma de la mosca con el gen dañado, ésta sobrevivía.

Aunque la cabeza de la mosca y la gallina difieren entre sí, la maquinaria genética que dirige parte de su desarrollo es lo suficiente-



4. LOS GENES HOX DESEMPEÑAN UNA FUNCION IMPORTANTE en el desarrollo de los planes corporales de numerosos animales. En la mosca de la fruta, el orden físico de los genes en el cromosoma (*abajo*) determina el orden de las estructuras en el embrión (*medio*) y, en definitiva, en el adulto (*arriba*). Por ejemplo, el gen *a* (gen *labial*) aparece primero en el cromosoma y en el embrión, y participa en la formación de la cabeza de la mosca.







5. LA HETEROCRONIA, o los desajustes temporales en los sucesos del desarrollo, explica algunas de las diferencias en el aspecto de un canguro (*izquierda*) y un humano (*derecha*) recién nacidos. Aunque el canguro nace en un estadio temprano del desarrollo, en comparación con el humano, necesita poder alimentarse de su madre en la bolsa. Un humano nunca podría realizar esa acción en el mismo estadio del desarrollo. La producción acelerada de las células de la cresta neural en el canguro adelanta el desarrollo de los rasgos faciales necesarios para alimentarse.

STEVE DOWNER (*izquierda*); EDD WESTMACOTT/ALAMY (*derecha*)/*American Scientist*

mente parecida para permitir el intercambio de los genes entre ambas especies. La semejanza de la base genética apunta a la restricción de algunos aspectos del plan corporal básico.

Algunos caracteres dependen en gran medida de otras estructuras, más que de las constricciones genéticas. Todas las estructuras están relacionadas en cierto modo, ya que no existen caracteres aislados, si bien algunas lo están más que otras. La columna vertebral de los humanos sostiene el cuerpo, provee además un lugar para la inserción de los músculos y sirve de conducto para los nervios y los vasos sanguíneos. Si se produjera un cambio en la columna, también se alterarían las estructuras que interactúan con ella.

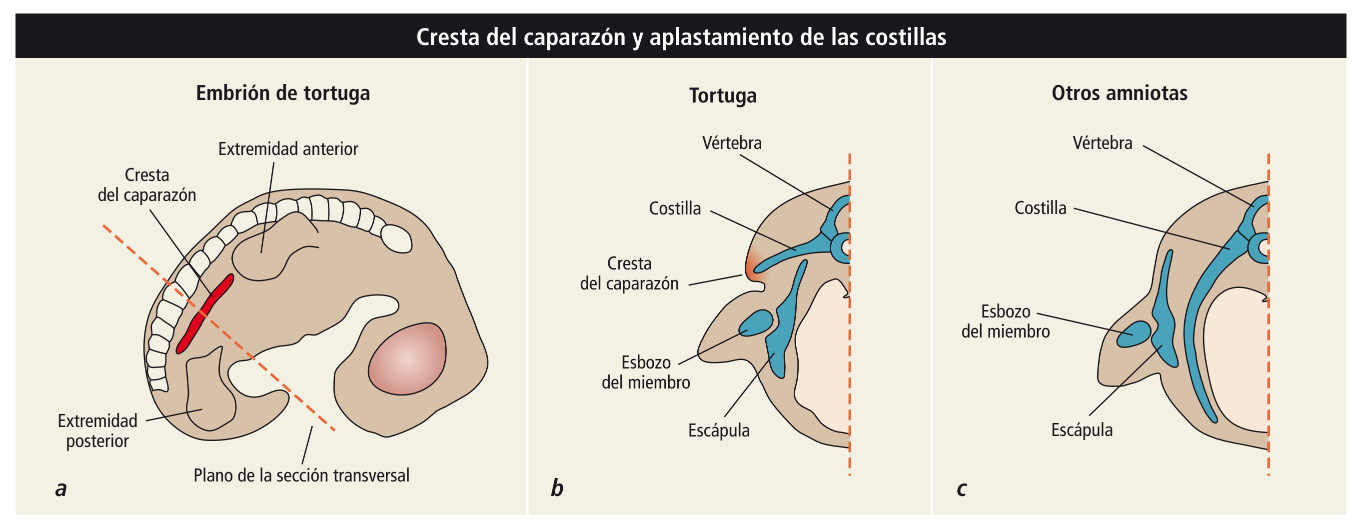
El proceso de la *canalización* puede también imponer límites a las estructuras. Este término surgió de la idea de representar una estructura como un paisaje de posibilidades. Si la estructura deseada se sitúa en un valle, las montañas que la rodean representan las fuerzas del desarrollo que limitan su potencial. La canalización es un proceso que ayuda a los sistemas de desarrollo a resistir los errores. Si un tejido se forma a partir de un conjunto de células que se congregan en un lugar y un momento determinados, existe un número mínimo de células que deberán migrar a ese punto para que el tejido se desarrolle adecuadamente. Por otro lado, si migraran sólo unas pocas células, pero éstas se dividieran más deprisa de lo normal, la mayor tasa de división permitiría crear el número de células necesario, a pesar de los problemas de migración.

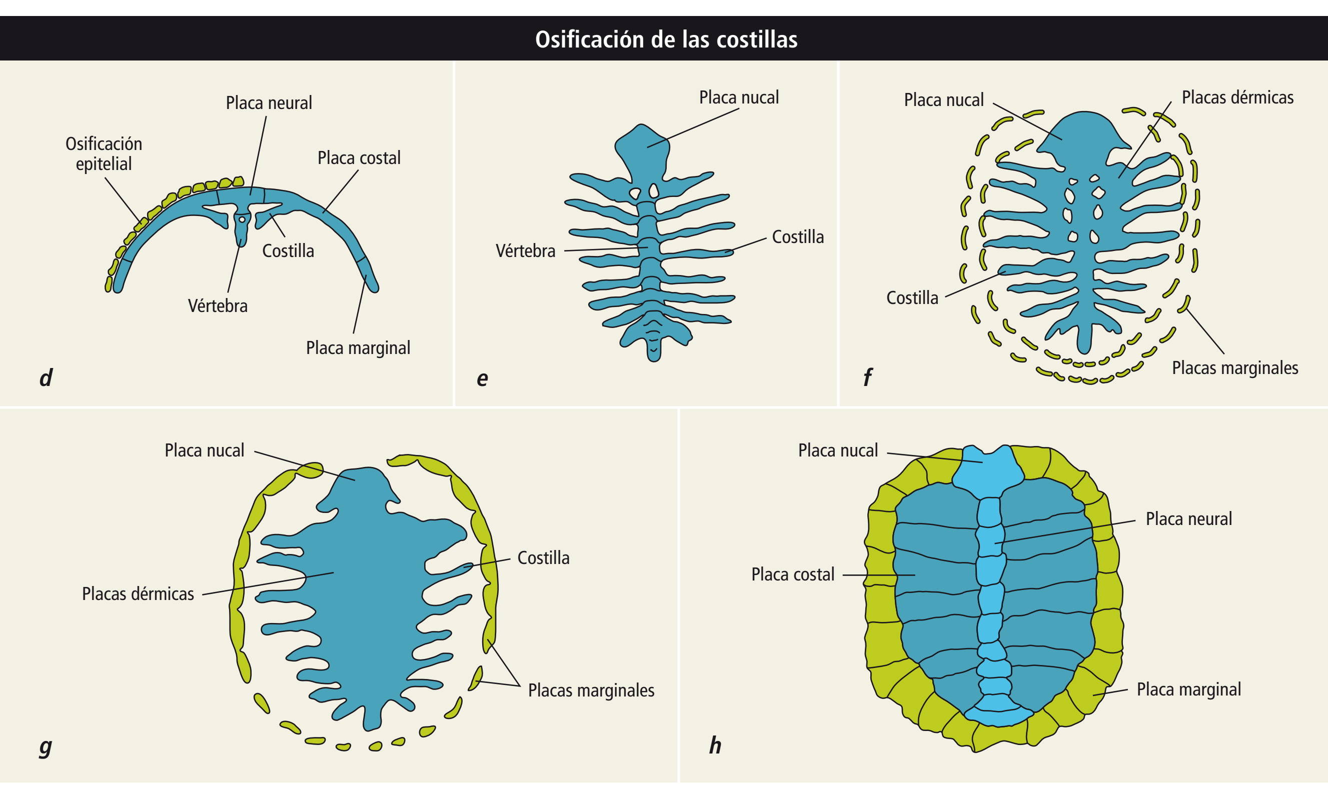
Libre de ataduras

Las variantes aparecen a pesar de la naturaleza conservadora de algunos sistemas del desarrollo. Las constricciones del desarrollo pueden ser anuladas por una mutación con un efecto drástico o por un cambio radical en el ambiente. La alteración es de tal magnitud, que el resto del sistema no la puede ocultar. Más aún, cuando se produce un cambio en el desarrollo, pueden quedar expuestos otros cambios que se hallaban ocultos o se habían corregido o compensado en el pasado. El conjunto de esas modificaciones podría dar lugar a estructuras completamente distintas. La canalización provee un escondite para los cambios del desarrollo que, bajo determinadas circunstancias, quedan al descubierto.

El grupo de Suzannah Rutherford, bióloga del Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson, en Seattle, demostró de forma elegante este concepto en las moscas de la fruta. Alteraron el funcionamiento de las proteínas de choque térmico (HSP, por sus siglas en inglés) presentes en todos los organismos. Las HSP ayudan a otras proteínas a adoptar o mantener la forma adecuada para que cumplan con su función. Algunas proteínas se desnaturalizan ante determinadas situaciones de estrés, como la exposición a altas temperaturas, ambientes tóxicos, infección o inanición. En esas condiciones aumenta la producción de HSP, que repara las proteínas dañadas.

El equipo de Rutherford alteró la función de las HSP de las moscas mediante mutaciones y la aplicación de temperaturas elevadas. La manipulación afectó a casi todas las estructuras de la mosca (antenas, ojos, patas y alas), aunque de forma indirecta: las HSP modificadas dejaron de actuar sobre las proteínas involucradas en las estructuras, que adquirieron una conformación inadecuada y perdieron su función. El trabajo de Rutherford demuestra que los mecanismos que ayudan a canalizar

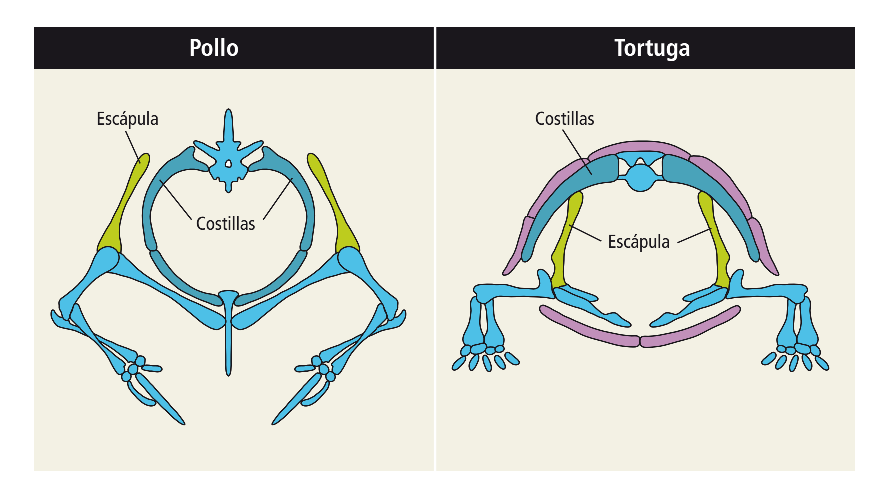




6. EL DESARROLLO DEL CAPARAZON DE LA TORTUGA comienza con la cresta del caparazón (*a*, *rojo*). Como se observa en el corte transversal (*línea discontínua roja en a*), la cresta atrapa las costillas y las arrastra hacia los lados (*b*), mientras que en los otros amniotas las costillas crecen hacia la región ventral donde se encuentra el esternón (*c*). A medida que avanza el desarrollo, las costillas de las tortugas siguen creciendo lateralmente (*d* y *e*). A continuación se forman los huesos dérmicos alrededor de las costillas (*f* y *g*). Al final del proceso, los huesos dérmicos se fusionan para formar el caparazón completo (*h*).

una estructura también pueden provocar cambios, aunque los resultados suelen ser extremos y desfavorables.

El cambio evolutivo puede surgir también como consecuencia de los desajustes en la cronología del desarrollo. La *heterocronía* (del griego *hetero*, distinto, y *chrono*, tiempo) describe las alteraciones provocadas por los desajustes temporales. Este fenómeno origina estructuras radicalmente diferentes cuando afecta a un estadio sensible del desarrollo. Los marsupiales, entre ellos los canguros, ofrecen un ejemplo de cambio heterocrónico. Estos animales nacen de forma prematura en comparación con los animales placentarios como los gatos, los perros y los humanos. Al nacer, los canguros se parecen más a un feto que a un recién nacido; pasan la mayor parte de su desarrollo dentro del marsupio materno. Sin embargo, pese a su desarrollo incompleto, encuentran el pezón dentro de la bolsa materna, se sujetan a él y succionan. Un mamífero placentario con un grado de desarrollo similar carece de los rasgos faciales y de la destreza motora necesaria para realizar esa tarea.



7. POSICION DE LA ESCAPULA (*verde*) que distingue a las tortugas (*derecha*) de las gallinas (*izquierda*), y del resto de los vertebrados. Los sucesos durante el desarrollo del caparazón de la tortuga llevan al arrastre de las costillas (*azul*) por encima de las escápulas; éstas adquieren así una posición interna. En la gallina, el desarrollo de las costillas las lleva hacia la región ventral; se forma un semicírculo desde la espina dorsal hasta el esternón, con lo que las escápulas quedan fuera de la caja torácica. Como se observa, un cambio en el desarrollo puede desencadenar otros cambios que originan diferencias importantes entre los animales.

La autora

Katherine E. Willmore investiga en el departamento de antropología de la Universidad estatal de Pensilvania. En 2006 obtuvo su doctorado en ciencias médicas por la Universidad de Calgary. Su investigación versa sobre la evolución y el desarrollo del cráneo y el rostro de los mamíferos.

El grupo de Kathleen Smith, de la Universidad de Duke, descubrió que los marsupiales recién nacidos podían alimentarse gracias al desarrollo más avanzado de sus músculos y huesos faciales, en comparación con los mamíferos placentarios. Smith demostró que existe una producción temprana de células de la cresta neural que contribuye al desarrollo de muchos rasgos faciales.

Cuando las novedades surgen como consecuencia del cambio de ubicación de un conjunto de procesos del desarrollo se produce la *heterotopía* (del griego *hetero*, distinto, y *topos*, lugar). A causa de esa alteración, algunas estructuras del desarrollo entran en contacto con otras de las que habitualmente están separadas. Pueden aparecer entonces estructuras en una nueva ubicación, tales como un conjunto adicional de patas o de alas, u originarse estructuras completamente nuevas.

La morfología de las bolsas en la mejilla para transportar alimentos constituye un ejemplo de heterotopía. En las ardillas y algunos ratones, esas bolsas representan el estado primitivo. Se desarrollan a partir de una invaginación de la piel de la cara interna de cada mejilla y están recubiertas de moco. En otros animales, como las tuzas y las ratas canguro, las bolsas se forman en el lado externo de sus mejillas y están recubiertas de pelaje. La invaginación se produce desde la región frontal del rostro hasta los labios y, en esta nueva posición, las bolsas en desarrollo entran en contacto con células que generan folículos pilosos y se origina el pelaje que recubre la cavidad. La posición anterior de la bolsa sitúa a ésta junto a un nuevo grupo de células que siguen rutas de crecimiento distintas. Esas células arrastran a la bolsa forrada de piel y la colocan en la cara externa de la mejilla. Ambos tipos de bolsas se forman por el mismo proceso, pero un ligero desplazamiento en los pasos iniciales del desarrollo conduce a la aparición de estructuras muy distintas.

Cada animal está formado por una mezcla de caracteres predeterminados y únicos, en cuyo desarrollo interviene una combinación de muchos de los fenómenos descritos arriba. Las tortugas nos proporcionan un buen ejemplo de la influencia de los distintos fenómenos en el origen de estructuras de interés.

Formación de una tortuga

Las tortugas son uno de los animales más primitivos: llevan deambulando por la Tierra más de 220 millones de años. Poseen una serie de rasgos distintivos, tales como el caparazón y una posición peculiar de las dos escápulas. Ambas características surgen como consecuencia de cambios simples en los programas del desarrollo existentes.

El equipo de Chun Li, de la Academia China de Ciencias de Pekín, describió en 2008 el fósil de tortuga más antiguo conocido, *Odontochelys*, datado en 220 millones de años. En *Odontochelys*, la parte ventral del cascarón, el plastrón, es de una sola pieza, mientras que el caparazón dorsal está incompleto. Sobre su espalda, las placas de hueso se distribuyen a lo largo de la región media, pero no llegan a cubrir las costillas en la región lateral. El desarrollo de este caparazón incompleto se asemeja bastante al desarrollo del caparazón de las tortugas actuales.

En un estadio temprano del embrión de tortuga, a ambos lados de los esbozos embrionarios de las patas traseras y delanteras aparecen unas protuberancias que se extienden lateralmente por el embrión. Se crea así la *cresta del caparazón*. La cresta está formada por dos tejidos embrionarios, el *mesénquima* y el *ectodermo*. El mesénquima es el precursor embrionario de las células y los vasos sanguíneos, así como de los huesos, los ligamentos y cartílagos; el ectodermo da origen al cerebro y los nervios, así como a la piel y otros rasgos externos, como la nariz, el pelo y las escamas. La cresta está compuesta por un núcleo de mesénquima rodeado de una delgada cubierta de ectodermo. En el desarrollo animal hallamos repetidamente esta composición, que es la responsable de organizar la formación de las extremidades y de otras estructuras.

La cresta atrapa a las costillas durante el desarrollo del caparazón. En la mayoría de los vertebrados de cuatro patas (tetrápodos) las costillas crecen desde la columna hacia el esternón y se forma la cavidad torácica; en las tortugas, en cambio, la cresta arrastra a las costillas hacia los lados dentro de la dermis, la capa media de la piel. La ubicación heterotópica de las costillas hace que se acelere el crecimiento conjunto de la cresta y de las costillas hacia los lados. Además, una tasa de

crecimiento heterocrónica de la dermis provoca un desarrollo de las costillas más rápido hacia los lados que hacia la región anterior. Como consecuencia de ambos procesos, las costillas son arrastradas más rápidamente hacia los lados de lo que crecen por sí mismas hacia adelante.

En las tortugas, el contacto entre las costillas y la dermis posibilita otra interacción, en concreto, entre el mesénquima y el ectodermo. Las costillas se componen inicialmente de cartílago, pero debido a su conexión con la cresta del caparazón, el hueso reemplaza al cartílago, que a su vez envía señales a la piel circundante para formar más hueso dérmico. Estos huesos continúan su crecimiento hasta que se fusionan entre ellos y con las costillas subyacentes. La localización heterotópica de las costillas dentro de la dermis crea una nueva interacción entre estructuras del desarrollo que da origen al hueso del caparazón.

Aunque el caparazón constituye una característica distintiva de las tortugas, los huesos dérmicos se observan también en los cocodrilos, en algunos peces y en los anfibios. Sin embargo, el aspecto verdaderamente único de las tortugas es la posición de la escápula. En el resto de los vertebrados, la escápula se sitúa detrás de las costillas, pero en las tortugas se encuentra delante. Las costillas rodean a las escápulas cuando están atrapadas en la cresta del caparazón y son arrastradas hacia los lados y hacia atrás. En cambio, en el resto de los vertebrados, las costillas crecen hacia la región frontal del cuerpo, quedando las escápulas detrás. La posición interna que ocupan las escápulas en las tortugas representa una ruptura con el plan corporal de los tetrápodos, lo que constituye una notable modificación evolutiva.

Los pequeños cambios en un período temprano del desarrollo pueden desencadenar efectos de gran alcance, como lo demuestra el ejemplo de las tortugas. Sin embargo, resulta casi imposible predecir cómo una leve modificación de una población celular —el caso de la cresta del caparazón— permite crear una organización del esqueleto completamente diferente y la formación de un caparazón óseo. Para recrear la apariencia inicial de las estructuras singulares se deben conocer los detalles específicos del programa de desarrollo de cada especie y la información que aportan las especies intermedias. Una vez más, se pone de manifiesto la complejidad de la evolución y la fascinación que la misma despierta.

Bibliografía complementaria

FROM GENOTYPE TO PHENOTYPE: BUFFERING MECHANISMS AND THE STORAGE OF GENETIC INFORMATION. S. L. Rutherford en *BioEssays*, vol. 22, págs. 1095-1105; 2000.

HETEROCHRONY REVISITED: THE EVOLUTION OF DEVELOPMENTAL SEQUENCES. K. K. Smith en *Biological Journal of the Linnean Society*, vol. 73, págs. 169-186; 2001.

HOW THE TURTLE FORMS ITS SHELL: A PARACRINE HYPOTHESIS OF CARAPACE FORMATION. J. Cebra-Thomas, F. Tan, S. Sistla, E. Estes, G. Bender, C. Kim, P. Riccio y S. F. Gilbert en *Journal of Experimental Zoology*, vol. 304B, pág. 558-569; 2005.

ON THE ORIGINS OF NOVELTY IN DEVELOPMENT AND EVOLUTION. A. P. Moczek en *BioEssays*, vol. 30, págs. 432-447; 2008.

Así piensan los bebés

Los niños, incluso los más pequeños, saben, experimentan y aprenden mucho más de lo que se creía

ALISON GOPNIK

Fotografías de Timothy Archibald

Hace unos treinta años, la mayoría de los psicólogos, filósofos y psiquiatras consideraban a los bebés como seres irracionales, egocéntricos y amorales. Seres anclados en lo particular e inmediato, incapaces de comprender las relaciones causales, de imaginar lo que experimentan otras personas o de apreciar la diferencia entre realidad y fantasía. Aún hoy, sigue siendo común catalogar a los niños como "adultos deficientes".

Sin embargo, en los últimos tres decenios se ha descubierto que los niños, incluso los de edad muy temprana, saben más de lo que se creía posible. Aprenden sobre el mundo de modo muy parecido a como lo hacen los científicos: mediante experimentos, análisis estadísticos y formación de teorías intuitivas en el dominio de lo físico, lo biológico y lo psicológico. En los últimos diez años se han comenzado a entender los procesos mentales y los mecanismos neurológicos y evolutivos que subyacen bajo sus llamativas y tempranas facultades cognitivas. Estos hallazgos no sólo nos obligan a modificar nuestras ideas sobre los niños de corta edad, sino que arrojan luz sobre la naturaleza humana.

Física para bebés

¿Por qué hemos tardado tanto en comprender el pensamiento infantil? Es cierto que, a primera vista, el comportamiento de un niño menor de cuatro años (el intervalo de edades al que nos referiremos aquí) no parece revelar procesos mentales demasiado complejos. Los bebés no saben hablar. Y los niños algo mayores, incluso los de preescolar, expresan sus pensamientos con dificultad. Si formulamos una pregunta de carácter general a un niño de tres años, lo más probable es que obtengamos como respuesta un hermoso pero incomprensible monólogo interior. En el pasado, investigadores como Jean Piaget, uno de los primeros estudiosos de la psicología infantil, llegaron a la conclusión de que el pensamiento del niño era irracional, ilógico, egocéntrico y "precausal" (falto de la noción de causa y efecto).

No obstante, desde finales de los años setenta del siglo pasado, la psicología infantil no se limita a analizar lo que los pequeños dicen, sino que se fundamenta en la observación de su comportamiento. Los bebés fijan la mirada más tiempo en los fenómenos que les resultan nuevos o inesperados que en los predictibles. Esa conducta permite adivinar lo que un niño espera que ocurra. Los resultados más firmes, sin embargo, proceden de los estudios que analizan las acciones voluntarias. ¿Qué objetos tratan de alcanzar los bebés? ¿Hacia cuáles gatean? ¿Cómo imitan los actos de quienes les rodean?

Los niños muy pequeños muestran gran dificultad para decirnos lo que piensan. Pero es posible emplear mejor el lenguaje para deducir lo que saben. Con el objetivo de reconstruir los pensamientos infantiles, Henry Wellman, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, ha analizado grabaciones de conversaciones espontáneas de niños. En lugar de preguntas de carácter general, a un niño se le pueden plantear preguntas muy concretas. Por ejemplo, pedirles que elijan una de entre dos opciones.

Los bebés saben mucho sobre el mundo que les rodea. Además, ese conocimiento no se restringe a meras sensaciones momentáneas. Renée Baillargeon, de la Universidad

CONCEPTOS BASICOS

- Las capacidades cognitivas de bebés y niños pequeños superan con mucho a las que tradicionalmente se les han venido atribuyendo. Pueden imaginar las experiencias de otras personas y captar relaciones causales.
- Los niños aprenden sobre el mundo tal y como hacen los científicos: a partir de la experimentación, los análisis estadísticos y la formación de teorías que expliquen sus observaciones.
- La prolongada indefensión de los niños pequeños quizá sea una necesidad de carácter evolutivo: una consecuencia derivada de poseer un cerebro apto para el aprendizaje y la creatividad.



Los bebés se fijan más en sucesos novedosos o inesperados. Esta conducta nos ayuda a averiguar lo que los niños esperan que ocurra.

de Illinois, y Elizabeth S. Spelke, de Harvard, han descubierto que los niños de corta edad comprenden procesos físicos básicos, como las trayectorias de objetos móviles o la gravedad. Dedican más tiempo a mirar cómo un cochecito de juguete parece atravesar un muro macizo que a otros acontecimientos acordes con los principios de la física cotidiana.

En torno a los tres o cuatro años, los niños ya poseen algunas ideas elementales sobre biología y empiezan a comprender las nociones de crecimiento, herencia o enfermedad. Tal conocimiento biológico precoz revela que, cuando razonan sobre la naturaleza de los objetos, los niños no se limitan a las apariencias superficiales. Susan A. Gelman, también de Michigan, ha observado que los niños pequeños creen que animales y plantas poseen una "esencia", un núcleo invisible que permanece invariable aunque cambie su aspecto exterior.

Pero, de entre todos los aspectos posibles, el conocimiento más importante para niños y bebés es el relativo a la gente que les rodea. Andrew N. Meltzoff, de la Universidad de Washington, ha demostrado que los recién nacidos perciben a las personas como algo único e imitan sus expresiones faciales.

En 1996, Betty Rapacholi (actualmente en Washington) y la autora descubrieron que los niños de 18 meses alcanzan a comprender que una persona pueda desear algo que ellos no desean. Una experimentadora les presentó a niños de 14 y de 18 meses un cuenco de brécol crudo y otro con galletitas en forma de pez. Probó después un poco de cada cuenco, poniendo en un caso gesto de repugnancia y de agrado en otro. Entonces extendió la mano y les dijo: "¿Me dais un poquito?". Los niños de 14 meses siempre ofrecían galletitas. Los de 18 meses, en cambio, le dieron brécol cuando ella fingía que le gustaba, si bien ellos nunca lo habrían escogido para sí mismos. Así pues, ni siquiera a tan temprana edad son los niños totalmente egocéntricos: pueden ponerse en lugar de otra persona. A los cuatro años, su comprensión de la psicología cotidiana se muestra más refinada aún. Pueden explicar, por ejemplo, que una persona está actuando de modo extraño porque cree en algo que no es verdad.

A finales del siglo pasado, los experimentos permitieron determinar cuán abstractos y elaborados son los pensamientos de los bebés, así como el impresionante incremento de sus conocimientos con la edad. Se ha llegado a sostener que los bebés ya nacen sabiendo gran parte de lo que saben los adultos sobre el comportamiento de cosas y personas. Es indudable que los neonatos no son meras páginas en blanco. Pero los cambios que muestran los niños en sus conocimientos hacen pensar, asimismo, que aprenden sobre el mundo a partir de sus propias experiencias.

Una de las principales preguntas de la psicología y de la filosofía consiste en elucidar la manera en que aprendemos a conocer el mundo a partir de una mezcolanza de datos sensoriales. En el último decenio se ha ahondado en las formas en que niños y bebés aprenden tanto y, además, con tanta rapidez y precisión. En particular, hemos descubierto que los pequeños poseen una extraordinaria capacidad para instruirse a partir de pautas estadísticas.

Estadística y experimentos

Dicha capacidad para inferir hechos a partir de patrones estadísticos fue demostrada en 1996 por Jenny R. Saffran, Richard N. Aslin y Elissa L. Newport (entonces investigadores de la Universidad de Rochester). Hicieron oír a bebés de ocho meses secuencias de sílabas ordenadas según ciertas pautas probabilísticas. La sílaba "bi", por ejemplo, podía oírse a continuación de "ro" sólo una de cada tres veces, mientras que "da" seguía siempre a "bi". Después les hicieron oír nuevas series de sonidos que, o bien se ajustaban a tales pautas, o bien las infringían. Los niños prestaban atención durante más tiempo a las series estadísticamente excepcionales. En estudios más recientes, se ha demostrado que los niños pueden detectar regularidades estadísticas en tonos musicales y escenas visuales, así como en patrones gramaticales más abstractos.

Los bebés alcanzan incluso a comprender la relación entre una muestra estadística y su población. En 2008, Fei Xu, de la Universidad de California en Berkeley, mostró a bebés de ocho meses una gran caja que contenía, mezcladas, numerosas bolas de dos colores: por ejemplo, un 80 por ciento de bolas blancas y un 20 por ciento de bolas rojas. La experimentadora extraía entonces 5 bolas, supuestamente al azar. Los niños mostraban mayor sorpresa (miraban durante más tiempo y con mayor persistencia) cuando Xu extraía cuatro bolas rojas y una blanca (muestra poco probable) que cuando sacaba cuatro blancas y una roja.

La detección de patrones estadísticos sólo supone el primer paso en el descubrimiento científico. Más impresionante aún resulta la manera en que los niños, al igual que los científicos, emplean la estadística para inferir conclusiones acerca del mundo. En una variante del estudio anterior con niños de 20 meses, se usaron ranitas verdes y patitos amarillos de juguete. Xu extraía de la caja cinco juguetes y pedía después a los niños que le dieran uno de entre los que se hallaban en una mesa. Si

La autora

Alison Gopnik es profesora de psicología y filosofía de la Universidad de California en Berkeley. Ha realizado novedosas investigaciones sobre la manera en que los niños desarrollan una "teoría de la mente" (la capacidad para comprender que otras personas poseen una mente propia y pueden creer o desear cosas distintas que ellos). También ha formulado la "teoría de la teoría", basada en la idea de que los niños aprenden de igual modo que los científicos. Gopnik sostiene que una comprensión adecuada de la mente infantil podría ayudarnos a resolver problemas filosóficos profundos, como el de la consciencia.

la caja contenía en su mayor parte ranitas y la investigadora extraía un gran número de ellas, los niños no mostraban preferencia alguna por el color. Pero, si sacaba sobre todo patitos, los niños le ofrecían un patito. Al parecer, los bebés pensaban que lo improbable de la selección indicaba que Xu no actuaba al azar, sino que prefería los patitos.

En nuestro laboratorio hemos investigado la manera en que los bebés se valen de datos estadísticos y de experimentos para establecer relaciones de causa y efecto. Nuestros resultados indican que su pensamiento dista mucho de ser "precausal". Les presentamos un artilugio al que llamamos "detector de *blickets*": una máquina que lanza destellos y toca música cuando se ponen sobre ella ciertos objetos (*blickets*), pero no otros. Después, mostramos a los niños las pautas de funcionamiento del detector y observamos qué conclusiones causales extraen. ¿Qué objetos son *blickets* y cuáles no?

En 2007, Tamar Kushmir (actualmente en Cornell) y la autora descubrimos que los niños de preescolar se sirven de las probabilidades para inferir cómo funciona la máquina. Empleamos dos bloques, uno amarillo y otro rojo, y pusimos repetidas veces alguno de ellos sobre la máquina. Esta se encendía en dos de cada tres ocasiones con el bloque amarillo, pero sólo una de cada tres con el rojo. Dimos los bloques a los niños y les pedimos que accionasen la máquina. Bebés que aún no sabían sumar ni restar optaban con mayor frecuencia por el bloque amarillo, el que había mostrado una mayor probabilidad de encenderla.

Los niños seguían eligiendo correctamente cuando movíamos el bloque sobre la máquina, que se activaba sin contacto. Al principio —según nos contaron—, les parecía improbable que tal "acción a distancia" encendiera la máquina. Sin embargo, continuaron valiéndose de la estadística para descubrir hechos nuevos y sorprendentes sobre el mundo.

En otro experimento, Laura Schulz, ahora en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, y la autora mostramos a niños de cuatro años un juguete provisto de un interruptor lateral y de dos ruedas dentadas, una azul y otra roja, en su parte superior. Al accionar el interruptor, las ruedas giraban. El juguete podía funcionar de varias maneras: quizás el interruptor activase las dos ruedas a la vez, o quizás accionase sólo la rueda azul, la cual arrastraba a la roja, etcétera.

Mostramos a los niños figuras que ilustraban cada una de las posibilidades (por ejemplo, un dibujo en el que la rueda azul empujaba a la roja). Después, les enseñamos juguetes que operaban de una u otra forma y les proporcionamos indicios más bien complejos sobre el mecanismo de cada uno. Los niños a quienes asignamos el juguete que operaba según la "cadena causal" supieron ver que, si se retiraba la rueda azul, no ocurría nada aunque se accionase el interruptor. Cuando les pedimos que eligiesen la figura que correspondía al funcionamiento del juguete, mostraron una destreza sorprendente para deducir el mecanismo del artefacto. Además, cuando dejamos a otros pequeños a solas con la máquina, jugaron con las ruedas de modo que les ayudase a comprender cómo funcionaba. Exactamente como si estuvieran experimentando.

Otro de los estudios llevados a cabo por Schulz empleaba un juguete provisto de dos palancas. A un grupo de preescolares se les mostró que, al accionar una de las palancas, salía un pato; al accionar la otra, aparecía un muñeco. A un segundo grupo sólo se le dejó ver que, al pulsar las dos palancas a la vez, salían ambas figuras, pero no tuvieron ocasión de ver el efecto de cada palanca por separado. Después, se dejó a todos los niños a sus anchas con el juguete. Los del primer grupo jugaron durante mucho menos tiempo que los del segundo. Ya conocían su funcionamiento, por lo que se hallaban menos interesados en explorar sus posibilidades. Los del segundo grupo, en cambio, se encontraban ante un misterio. Jugando a su capricho, no tardaron es descubrir el efecto de cada palanca.

Parece, pues, que cuando los niños juegan de manera espontánea, "trasteando con todo", están al propio tiempo experimentando y buscando relaciones causales: el procedimiento más eficaz para descubrir cómo funciona el mundo.

Cerebros bayesianos

Como es obvio, cuando los niños analizan datos estadísticos o realizan experimentos, no lo hacen de manera consciente, tal y como lo



EXPERTOS EN ESTADISTICA

Los niños poseen gran destreza para apreciar regularidades estadísticas. Se ha observado que bebés de ocho meses notan si se ha extraído un conjunto improbable de bolas rojas de una caja con mayoría de bolas blancas. Variantes del experimento (como el intercambio de los colores rojo y blanco) permiten desechar otras explicaciones (por ejemplo, que el rojo les resulte más llamativo). En experimentos con juguetes verdes y amarillos, bebés de veinte meses inferían que, si una persona tomaba un gran número de juguetes del color más escaso, lo hacía porque prefería los juguetes de ese color. Los niños aprenden cómo es el mundo al igual que los científicos: mediante la detección de pautas estadísticas y la extracción de conclusiones.

EXPERIMENTADORES NATOS

Los niños de cuatro años son expertos a la hora de interpretar indicios para relacionar causas y efectos. Por ejemplo, logran averiguar si una de las ruedas de una máquina mueve a otra o no (*abajo*). Algunos llegaron a efectuar los experimentos adecuados (y extrajeron la conclusión correcta) mientras "jugaban" a su aire. En un experimento con un "detector de *blickets*" (*página contigua*), una máquina que emite luz y música con ciertas combinaciones de objetos (*blickets*), se comprobó que los niños de cuatro años recurrían a la estadística para averiguar el funcionamiento del dispositivo. Ello seguía siendo así aun cuando la máquina operaba de manera nueva e inesperada. De hecho, los niños mostraron una mayor apertura mental que los adultos cuando comprobaron que la máquina respondía de manera atípica.



haría un científico adulto. Sin embargo, sí es lícito pensar que su cerebro procesa la información según las mismas pautas que rigen el método científico. La idea central de la ciencia cognitiva considera al cerebro como una especie de computadora diseñada por la evolución y programada por la experiencia.

En informática y filosofía se han comenzado a aplicar modelos matemáticos de la probabilidad para comprender las facultades de aprendizaje de los científicos y, con ello, también las de los niños. Hoy en día, contamos con novedosos algoritmos de inteligencia artificial basados en los modelos bayesianos ("redes bayesianas" o "de creencia"). Tales programas se aplican a problemas de gran complejidad, desde los que tratan de la expresión génica hasta los relativos al cambio climático. Esos mismos métodos han servido para alumbrar nuevas ideas sobre los mecanismos del pensamiento infantil.

Dichos modelos combinan dos ideas fundamentales. En primer lugar, se formulan matemáticamente las diferentes hipótesis que un niño puede formarse sobre las cosas. Una manera de representar el conocimiento causal de un niño es mediante un grafo de relaciones causales entre acontecimientos: por ejemplo, una flecha que parta del nodo "accionar la palanca azul" y lo asocie con "sale un pato" serviría para representar dicha hipótesis.

En segundo lugar, los programas relacionan de manera específica las diferentes hipótesis a partir de la probabilidad de se sucedan determinados acontecimientos; es decir, el tipo de regularidades a las que la ciencia recurre en la experimentación y en el análisis estadístico. Las hipótesis que mejor cuadran con los datos adquieren mayor verosimilitud. En nuestra opinión, el cerebro de los niños quizá relacione de modo parecido las suposiciones acerca del mundo con los patrones probabilísticos. El razonamiento infantil sigue pautas complejas que no resulta posible explicar mediante reglas ni asociaciones simples.

De hecho, cuando los niños se valen inconscientemente del análisis bayesiano, quizá superen a los adultos a la hora de considerar posibilidades insólitas. En un estudio presentamos a niños de cuatro años y a individuos adultos un detector de *blickets* inusual, pues para activarlo era preciso colocar sobre el detector no uno, sino dos bloques. Los niños aventajaron a los adultos en la tarea de averiguar aquella estructura causal poco común. Los adultos parecían fiarse más de sus ideas previas sobre el funcionamiento de las cosas, a pesar de que los tanteos daban a entender que, en esa máquina, algo obraba de modo inusitado.

En otra investigación reciente, hallamos que, si creen estar siendo instruidos, los pequeños pueden modificar sus análisis estadísticos y tornarse menos creativos. La experimentadora mostró a niños de cuatro años un juguete que tocaba música si se realizaba una breve serie de acciones en la secuencia correcta: por ejemplo, tirar de una palanca y oprimir después una perilla. A unos niños la investigadora les decía: "No sé cómo funciona este juguete, vamos a averiguarlo". A continuación, ella ensayaba largas series de tanteos, algunos de los cuales terminaban con la breve secuencia que hacía sonar la música y otros no. Cuando pidió a los niños que hicieran funcionar el juguete, muchos de ellos probaron con la secuencia correcta. A partir de un análisis estadístico de lo que habían visto, se limitaron a la secuencia necesaria para hacer sonar la música y, de manera astuta, omitieron los pasos superfluos.

A otros niños la experimentadora les dijo que iba a enseñarles cómo funcionaba el juguete. Les mostró algunas secuencias que producían música (con pasos adicionales innecesarios) y otras que no. Cuando les pidió que accionasen el juguete, los niños imitaron la secuencia completa de acciones, sin buscar nunca un atajo. ¿Estaban despreciando la estadística de lo que vieron? Puede que no. Su conducta queda descrita con precisión por un modelo bayesiano en el que se confía en que la "maestra" elija las secuencias más instructivas. Dicho de otro modo, si la maestra conociera

secuencias correctas más breves, no les habría enseñado acciones innecesarias.

Evolución y neurología

Si se acepta que el cerebro es una computadora diseñada por la evolución, podemos preguntarnos también por la justificación evolutiva y el fundamento neurológico de las extraordinarias facultades de aprendizaje que vemos en niños y bebés. El pensamiento biológico moderno se halla en estrecho acuerdo con lo observado en el laboratorio de psicología.

Desde una perspectiva evolutiva, uno de los rasgos más llamativos del ser humano es su largo período de inmadurez. Nuestra infancia dura mucho más que la de cualquier otra especie. ¿Por qué dejar a los bebés tan indefensos durante tanto tiempo, cuando ello exige de los adultos gran trabajo y dedicación para mantener vivos a sus hijos?

En todo el reino animal, la inteligencia y la versatilidad de los adultos se hallan correlacionadas con la inmadurez de las crías. Las especies precoces, como la gallina, cuentan con capacidades innatas muy específicas adaptadas a un ambiente concreto y, por ello, maduran con rapidez. En cambio, las especies altriciales (aquellas cuya progenie requiere cuidados y alimentación por parte de sus progenitores) se basan en el aprendizaje. Las crías del cuervo, por ejemplo, dependen de sus progenitores mucho más tiempo que las de la gallina. Pero más tarde, sin embargo, pueden tomar un objeto nuevo, como un trozo de alambre, y valerse de él como instrumento.

Una estrategia basada en el aprendizaje presenta numerosas ventajas, pero, durante el período de aprendizaje, el individuo se encuentra indefenso. La evolución resuelve este problema mediante la división del trabajo entre crías y progenitores. Los bebés han de ser protegidos durante un tiempo para que aprendan sobre el entorno y, entre tanto, no han de hacer prácticamente nada más. Cuando crecen, pueden valerse de lo aprendido para sobrevivir, reproducirse mejor... y cuidar a la generación siguiente. En esencia, un bebé no es sino "algo diseñado para aprender".

La neurociencia ha comenzado a entender algunos de los mecanismos cerebrales que sustentan el aprendizaje infantil. El cerebro de un bebé es más versátil que el de un adulto. En primer lugar, posee muchas más conexiones entre neuronas. Ninguna de ellas es especialmente eficiente, pero, con el tiempo, se suprimen las conexiones menos empleadas y se refuerzan las más útiles. Además, el cerebro de un bebé cuenta con elevadas concentraciones de las sustancias encargadas de facilitar modificaciones entre las conexiones neuronales.



La corteza prefrontal es una región característica del cerebro humano; su maduración es especialmente prolongada. Gobierna las capacidades de un adulto para centrarse en una acción, planearla y ejecutarla con eficacia (capacidades que requieren un prolongado aprendizaje desde la infancia). De hecho, las conexiones neuronales de dicha región pueden no quedar completas hasta pasados los veinte años.

La ausencia de control por parte de la corteza prefrontal en niños pequeños puede parecer un inconveniente, pero tal vez constituya una enorme ventaja para el aprendizaje. El área prefrontal inhibe pensamientos o actos irrelevantes. Pero esa falta de inhibición puede contribuir a que los niños exploren libremente. Existe un compromiso entre la exploración creativa y el aprendizaje flexible, típicos de los niños, y la capacidad para planificar y actuar con eficacia que exhiben los adultos. Las mismas cualidades que se requieren para actuar con eficiencia (como un procesamiento automático veloz y una red neuronal perfectamente "podada") pueden ser profundamente opuestas a las cualidades necesarias para el aprendizaje, como la flexibilidad.

De las investigaciones del último decenio ha aflorado una nueva imagen de la infancia y de la propia naturaleza humana. Los bebés, lejos de ser adultos incompletos, son seres exquisitamente diseñados por la evolución para explorar, aprender, cambiar y crear. Tales capacidades, tan inherentes al ser humano, se presentan en sus más puras formas en los primeros años de nuestras vidas. Los más valiosos logros de nuestra especie han sido posibles porque una vez fuimos niños indefensos y totalmente dependientes, no a pesar de ello. La infancia y los cuidados que ésta requiere son consustanciales a nuestra humanidad.

Bibliografía complementaria

PALABRAS, PENSAMIENTOS Y TEORIAS. Alison Gopnik y Andrew N. Meltzoff. A. Machado Libros, 1999.

BAYESIAN NETWORKS, BAYESIAN LEARNING AND COGNITIVE DEVELOPMENT. Sección especial en *Developmental Science*, vol. 10, n.º 3, págs. 281-364; mayo de 2007.

CAUSAL LEARNING: PSYCHOLOGY, PHILOSOPHY, AND COMPUTATION. Dirigido por Alison Gopnik y Laura Schulz. Oxford University Press, 2007.

THE PHILOSOPHICAL BABY: WHAT CHILDREN'S MINDS TELL US ABOUT TRUTH, LOVE, AND THE MEANING OF LIFE. Alison Gopnik. Farrar, Straus and Giroux, 2009.

La selenografía en los siglos XIX y XX

Desde la invención de la fotografía hasta el comienzo de la exploración local

Manfred Gottwald

CONCEPTOS BASICOS

- La invención de la fotografía supuso grandes avances para la selenografía. En particular, permitió una representación completa y detallada de la superficie lunar, así como la instauración de una toponimia universal.
- Las primeras sondas lunares, además de revelar la topografía de la cara oculta del satélite, obtuvieron una resolución sin precedentes que posibilitó planear con detalle los primeros alunizajes.
- A día de hoy, la cartografía lunar disponible se considera completa. La investigación actual se centra en las propiedades geológicas y mineralógicas de su superficie.

Desde la invención del telescopio hasta el siglo XIX, los astrónomos se limitaron a investigar la superficie lunar mediante observaciones visuales [*véase* "Orígenes y desarrollo de la cartografía lunar"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2010]. Sin embargo, la llegada de la fotografía les proporcionó una nueva herramienta con la que afinar sus observaciones.

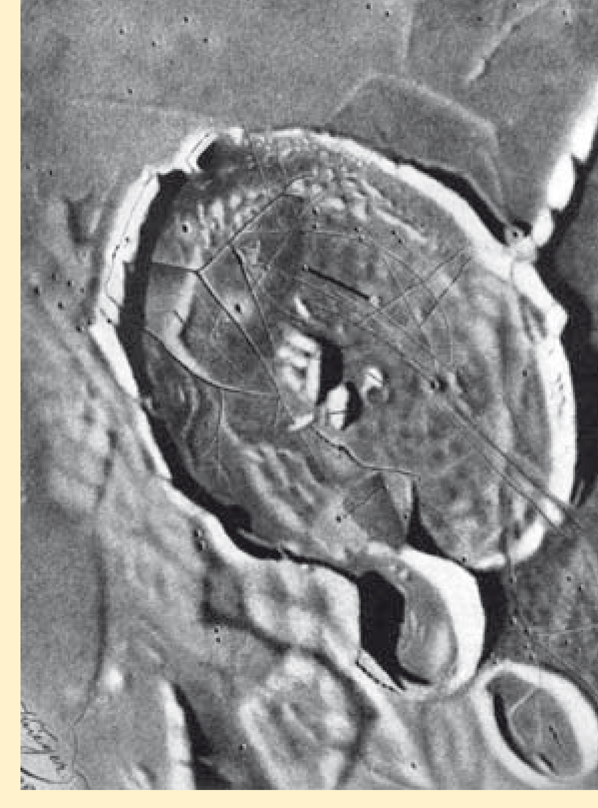
Ya en diciembre de 1839, John Draper (1811-1882) consiguió, desde Nueva York, fijar la imagen de la Luna en un daguerrotipo con un telescopio de 12 centímetros y una exposición de veinte minutos. Exposiciones tan prolongadas exigían una gran precisión de seguimiento. Además, la calidad final dependía en gran medida de las turbulencias atmosféricas. Es por ello que las primeras fotografías no mostraban un gran número de los detalles que sí podían apreciarse con un telescopio de tamaño mediano. Sin embargo, presentaban sus propias ventajas: las fotografías podían analizarse en el laboratorio (lo que evitaba los laboriosos trabajos de medida sobre el telescopio) y mostraban la Luna de un modo realista y hasta entonces desconocido (*véase la figura 1*).

Algunos selenógrafos recurrieron a métodos ingeniosos para mejorar la baja calidad de las primeras fotografías. El ingeniero escocés James Nasmyth (1808-1890, inventor del telescopio homónimo) y James Carpenter (1840-1899) reprodujeron varias formaciones lunares en modelos de yeso que después fotografiaron (*véase la figura 2*). Las imágenes, que recordaban a las escenas de los primeros filmes de ciencia ficción, aparecieron en 1874 en el volumen *La Luna: considerada como un planeta, un mundo y un satélite*.

Otros estudiosos, como Ladislaus Weinek (1848-1913), director del Observatorio Astronómico de Praga, y Johann Nepomuk Krieger (1865-1902) emplearon métodos alternativos. Weinek dibujaba directamente las placas fotográficas con el objetivo de plasmar los detalles que se perdían en el revelado. Krieger, por su parte, mejoraba a mano la baja calidad de las fotografías a partir de sus observaciones visuales. Resulta fácil imaginar el esfuerzo y minuciosidad que ambos métodos exigían.

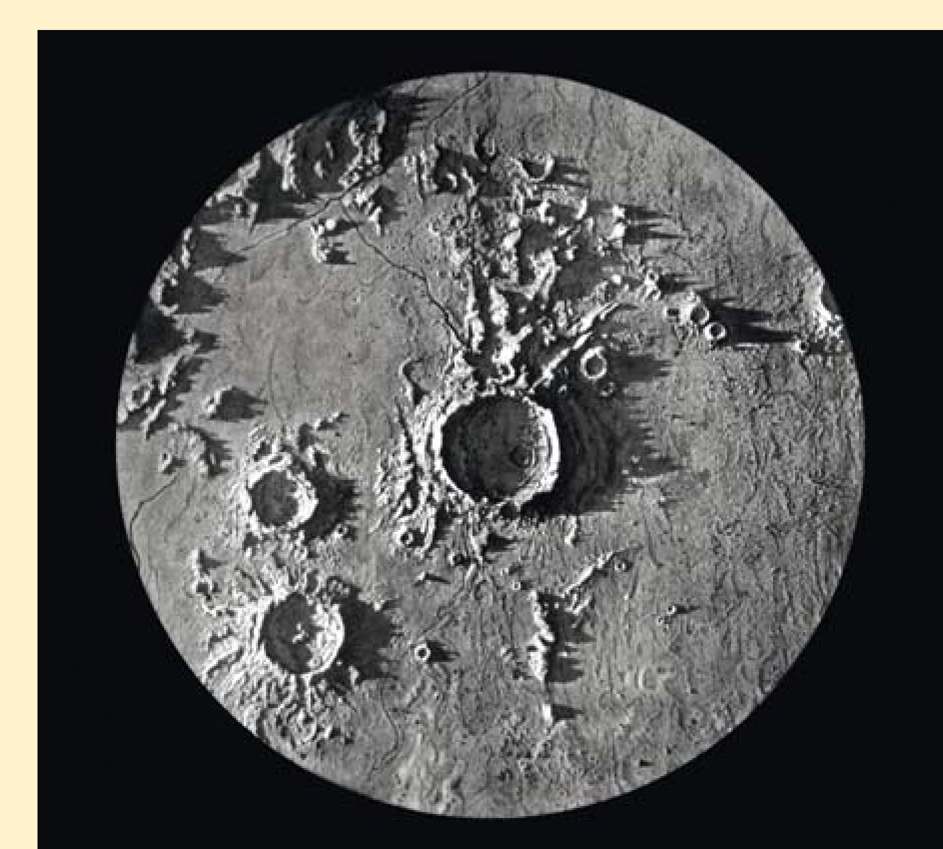
El primer tomo con los trabajos de Krieger apareció en 1898; el segundo habría de esperar hasta 1912, diez años después de su muerte. Llevó a cabo sus observaciones visuales con

1. FOTOGRAFIA DE LA LUNA de Lewis M. Rutherfurd, del año 1865.



3. EL CRATER GASSENDI según se reproducía en la tabla 46 del segundo tomo del atlas fotográfico de Johann Nepomuk Krieger. Los detalles más finos fueron trabajados a mano sobre la fotografía original.





2. MODELO DE YESO del cráter de Arquímedes (*derecha*) fabricado por James Nasmyth (*arriba*) y James Carpenter en 1874.

DIE CHEMISCHEN WIRKUNGEN DES LICHTS UND DIE PHOTOGRAPHIE. H. W. VOGEL, 1873 (*arriba, izquierda*); *DER HIMMEL IM BILD*. P. STRUKER, 1942 (*arriba, derecha*); COPIAS DEL ORIGINAL Y DE LA IMPRESION FACSIMIL, BIBLIOTECA DEL MUSEO ALEMAN, MUNICH (*abajo*)/*Sterne und Weltraum*

un refractor de 26 centímetros; primero en su observatorio privado de Múnich y, a partir de 1895, en Trieste, debido a la mejor calidad del aire. Como base para su trabajo empleó sus propias fotografías y placas de los observatorios de Lick (en California) y de París. La imagen del cráter de Gassendi que reproducimos en la figura 3 hace patente el rigor con el que Krieger introdujo pequeños detalles. A cada mapa de su *Atlas de la Luna* se superponía una hoja transparente sobre la que se identificaban los accidentes geográficos.

Poco después, las técnicas posibilitaron fotografías de mejor resolución que superaron las contribuciones híbridas de Krieger y Weinek. Los astrónomos del Observatorio de Lick serían los primeros en proponerse publicar un atlas fotográfico de la Luna. Con un telescopio refractor de 91 centímetros, llevaron a cabo sus intentos durante los años 1896 y 1897. El proyecto, sin embargo, nunca llegó a ver la luz.

Más éxito tuvieron Maurice Loewy (1833-1907) y Pierre H. Puiseux (1855-1928) con el refractor Coudé de 60 centímetros del Observatorio de París. Entre 1896 y 1909 consiguieron completar un atlas de la Luna con 80 fotografías de 50 × 70 centímetros (*véase la figura 4*). Si bien el mismo no cubría completamente la superficie lunar ni empleaba una única escala, habrían de pasar casi 60 años hasta que apareciese una obra de mejor calidad.

A finales del siglo XIX la selenografía había recorrido ya un largo camino. La astronomía se había convertido en una ciencia moderna y la Luna era el objeto de numerosas investigaciones. Las publicaciones especializadas (*Astronomischen Nachrichten* existía desde 1821, algo más tarde apareció *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* y, en 1895, *Astrophysical Journal*) contenían nuevas contribuciones sobre nuestro satélite, también las dedicadas a su cartografía. ¿Qué más quedaba por hacer?

Hacia una toponimia unificada

Valiéndose de placas fotográficas, el profesor británico Samuel Saunder (1852-1912) midió las posiciones de numerosos accidentes lunares pertenecientes al centro del satélite. Por su parte, Julius Franz (1847-1913), del Observatorio Astronómico de Breslau, se encargó de las relativas al borde lunar. Sus trabajos pusieron de manifiesto que la nomenclatura se hallaba repleta de contradicciones. Por encargo de la Real Sociedad de Astronomía británica, Saunder comenzó un programa con el objetivo de unificar la toponimia. El mismo habría de prolongarse durante 30 años.





COPIAS DEL ORIGINAL Y DE LA IMPRESION FACSIMIL, BIBLIOTECA DEL MUSEO ALEMAN, MUNICH/*Sterne und Weltraum*

4. IMAGEN DEL TERMINADOR en el Polo Sur de la Luna (*derecha*) según aparecía en el atlas lunar de Maurice Loewy (*arriba*) y Pierre H. Puiseux.

Tras la fundación en 1919 de la Unión Astronómica Internacional (UAI), su Comisión número 17 dirigiría dicho proyecto. Destacados participantes fueron el dibujante William H. Wesley (1841-1922), el funcionario checo Karl Müller (1866-1942) y Mary A. Blagg (1858-1944), astrónoma aficionada. En particular, Mary Blagg, quien ya en 1913 había publicado su *Recopilación de formaciones lunares*, se dedicó a la ardua tarea de comparar la nomenclatura existente, despojarla de contradicciones y catalogar las formaciones lunares con sus correspondientes posiciones en una tabla libre de ambigüedades.

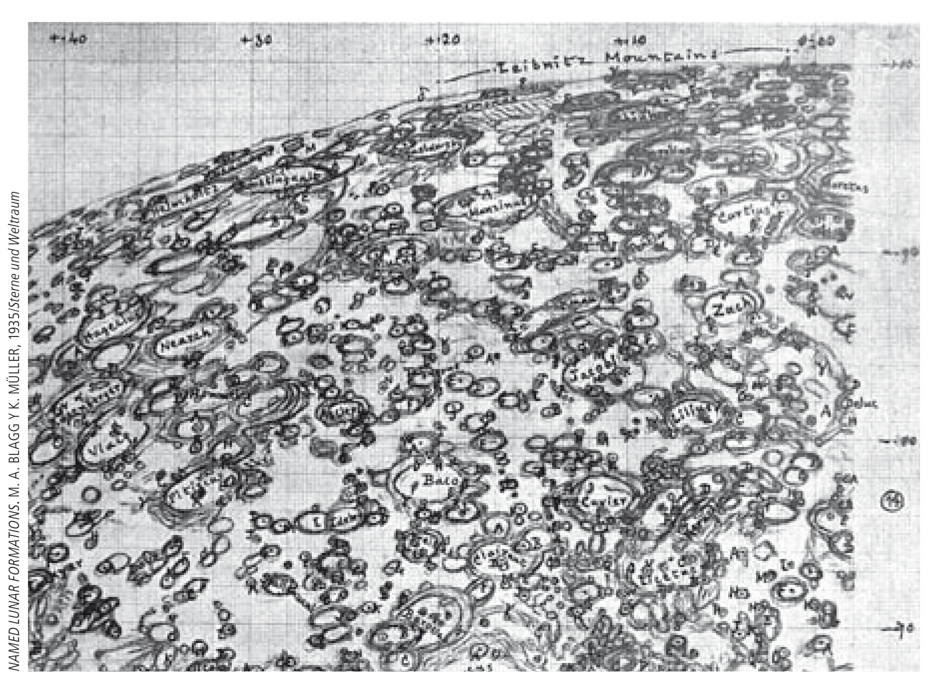
En 1935 vio la luz el informe de la UAI *Nomenclatura de las formaciones lunares*, recopilado por Mary Blagg y Karl Müller. Contenía 14 hojas que mostraban la Luna con un diámetro de unos 90 centímetros y una tabla que incluía más de 6000 accidentes. Las cartas de las regiones interiores, muy llamativas, fueron confeccionadas por William Wesley. Tras su muerte, Mary Blagg esbozó las regiones externas restantes con el único objeto de ilustrar la toponimia (*véase la figura 5*).

Un año después, el *Mapa general de la Luna en seis hojas* de Philipp Fauth (1867-1941) aportaba una representación unificada del satélite que incluía las designaciones de la UAI (*véase la figura 6*). Fauth había adquirido fama como selenógrafo gracias a la publicación de varias obras. En 1895, aún como profesor en la región del Palatinado Renano, había realizado mapas de algunas formaciones lunares que demostraban sus cualidades como observador y dibujante. Había dirigido los



COPIAS DEL ORIGINAL Y DE LA IMPRESION FACSIMIL, BIBLIOTECA DEL MUSEO ALEMAN, MUNICH/*Sterne und Weltraum*

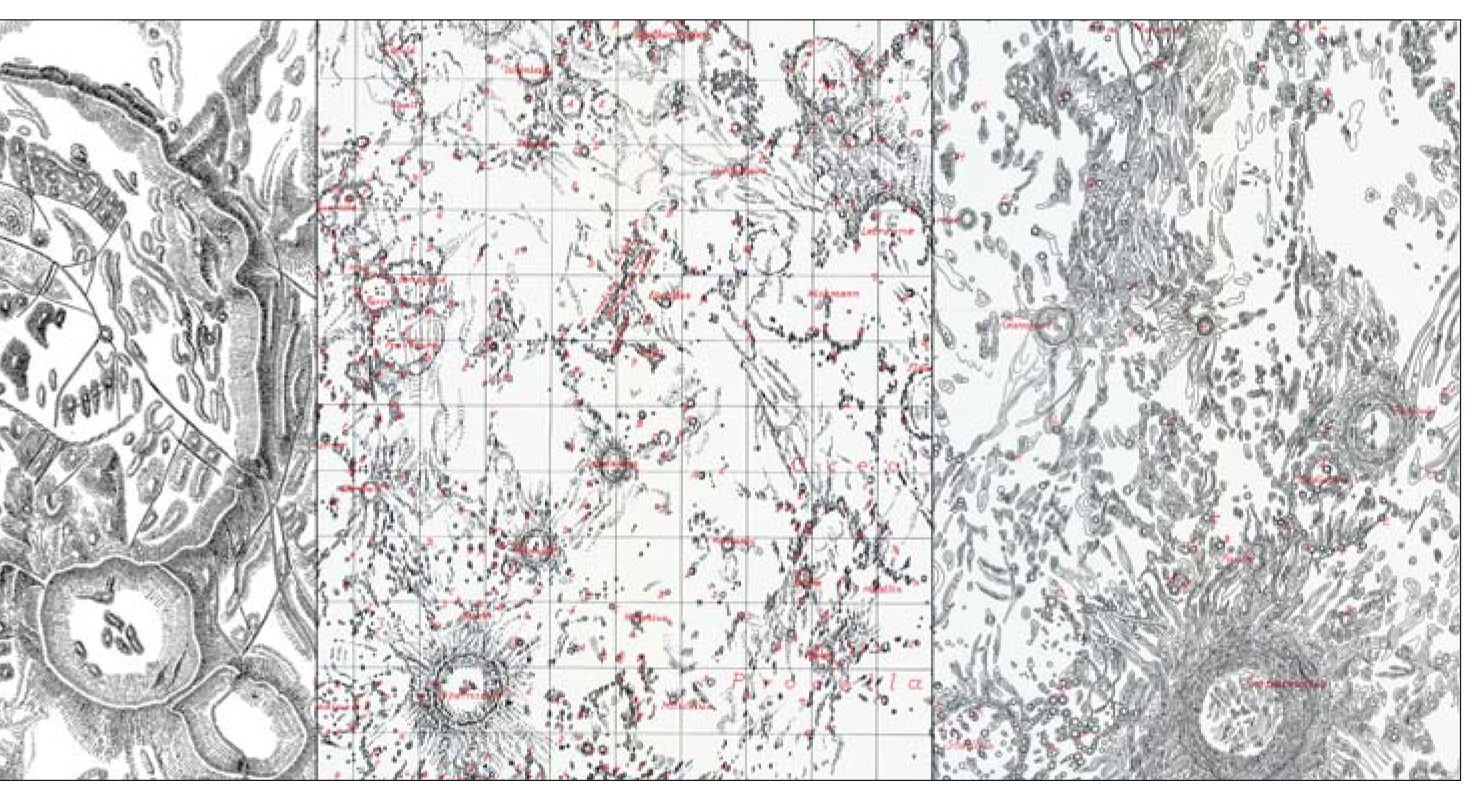




NAMED LUNAR FORMATIONS. M. A. BLAGG Y K. MÜLLER, 1935/*Sterne und Weltraum*

5. LA REGION DEL POLO SUR de la Luna, dibujada por Mary Blagg.

6. EL CRATER GASSENDI en un detalle de la obra de 1906 de Philipp Fauth (*izquierda*). Detalle de su carta general de 1936, con el cráter Gassendi arriba a la derecha y el de Copérnico abajo a la izquierda (*centro*). Finalmente, el cráter de Copérnico según aparecía en su gran carta lunar. Fauth utilizó diversas técnicas: sombreado, líneas de contorno y una mezcla de ambas.





7. EL MAR DE LA LLUVIA junto a los montes Alpes. Fotografía tomada con el telescopio de 2,5 metros de Monte Wilson.

observatorios privados de Kaiserslautern y de Grünwald, cerca de Múnich, donde operó con telescopios como el Schupmann-Medial de 38 centímetros. Su obra quedó recogida en el libro *Nuestra Luna*, aparecido en 1936. El *Gran atlas de la Luna*, una recopilación póstuma a partir de sus dibujos, no se editaría hasta 1964. Incluía una carta de 3,5 metros de diámetro dividida en 22 hojas.

Es interesante notar el modo en que, en un principio, las "caducas" técnicas de dibujo siguieron desempeñando una función relevante. Si bien la cartografía visual había perdido relevancia científica, sus resultados seguían exhibiendo un considerable atractivo estético. El aficionado británico Hugh P. Wilkins (1896-1960) emprendió un proyecto a escala aún mayor que Fauth: su mapa de 1951, muy poco difundido, exhibía un diámetro de más de 7,5 metros. En ediciones posteriores aparecieron versiones de menor tamaño. Sin embargo, la superficie lunar mostraba tal cúmulo de detalles que el manejo de su mapa resultaba casi imposible.

Las obras de Fauth y Wilkins pusieron fin a una tradición de observaciones visuales que contaba con más de tres siglos de antigüedad. El acceso a telescopios de mayor tamaño y los adelantos en las técnicas fotográficas posibilitaron imágenes cada vez más refinadas. De la primera mitad del siglo XX podemos destacar las fotografías del refractor de un metro del Observatorio Yerkes, en Chicago, así como las del espejo de 2,5 metros instalado en 1917 en el Observatorio de Monte Wilson, en Los Angeles (*véase la figura 7*). También se obtuvieron fotografías de alta resolución desde el Pico de Midi (Bigorre), en los Pirineos, cuyas condiciones de visibilidad permitían resultados excelentes. Con todo, la idea de recopilar un atlas fotográfico de la Luna no llegaría hasta los años cincuenta del siglo pasado. Fue entonces cuando Gerard P. Kuiper (1905-1973), director de los observatorios Yerkes y McDonald, propuso reunir las mejores fotografías disponibles en una publicación conjunta.

El resultado vio la luz en 1960 con la publicación del *Atlas fotográfico de la Luna*, una colección de 281 fotos de gran formato procedentes de Monte Wilson, Lick, Pico de Midi, McDonald y Yerkes. En él ya se avanzaba la publicación de obras complementarias: en 1961 aparecía el *Atlas ortográfico de la Luna*, que superponía a las fotografías un sistema ortogonal de coordenadas con 5000 puntos de referencia. Dos años más tarde se publicó el *Atlas lunar rectificado*, en el que se corregían regiones cercanas al borde lunar.

Por fin, Kuiper y sus colaboradores publicaron en 1967 el *Atlas lunar consolidado*, que, aún hoy, sigue siendo considerado el mejor atlas fotográfico de todos los tiempos. Consta de dos partes: la primera muestra la Luna con iluminación lateral (192 fotos); la segunda incluye fotografías en las que el Sol incide directamente sobre el satélite (35 fotos). Así, quedaban registradas la topografía y el albedo lunar (*véase la figura 8*). Las fotos de la primera parte se obtuvieron durante los años sesenta con el espejo de 1,5 metros del Observatorio Catalina, si bien algunas se remontan a placas antiguas tomadas con el refractor de Lick. La segunda parte contiene, sobre todo, fotos del espejo de 1,5 metros del Observatorio Naval de EE.UU., además de algunas procedentes de los refractores de Yerkes y Lick. Su tirada nunca fue numerosa ya que el atlas nunca se publicó como tal, sino sólo como una colección de fotografías de gran valor.

La era espacial

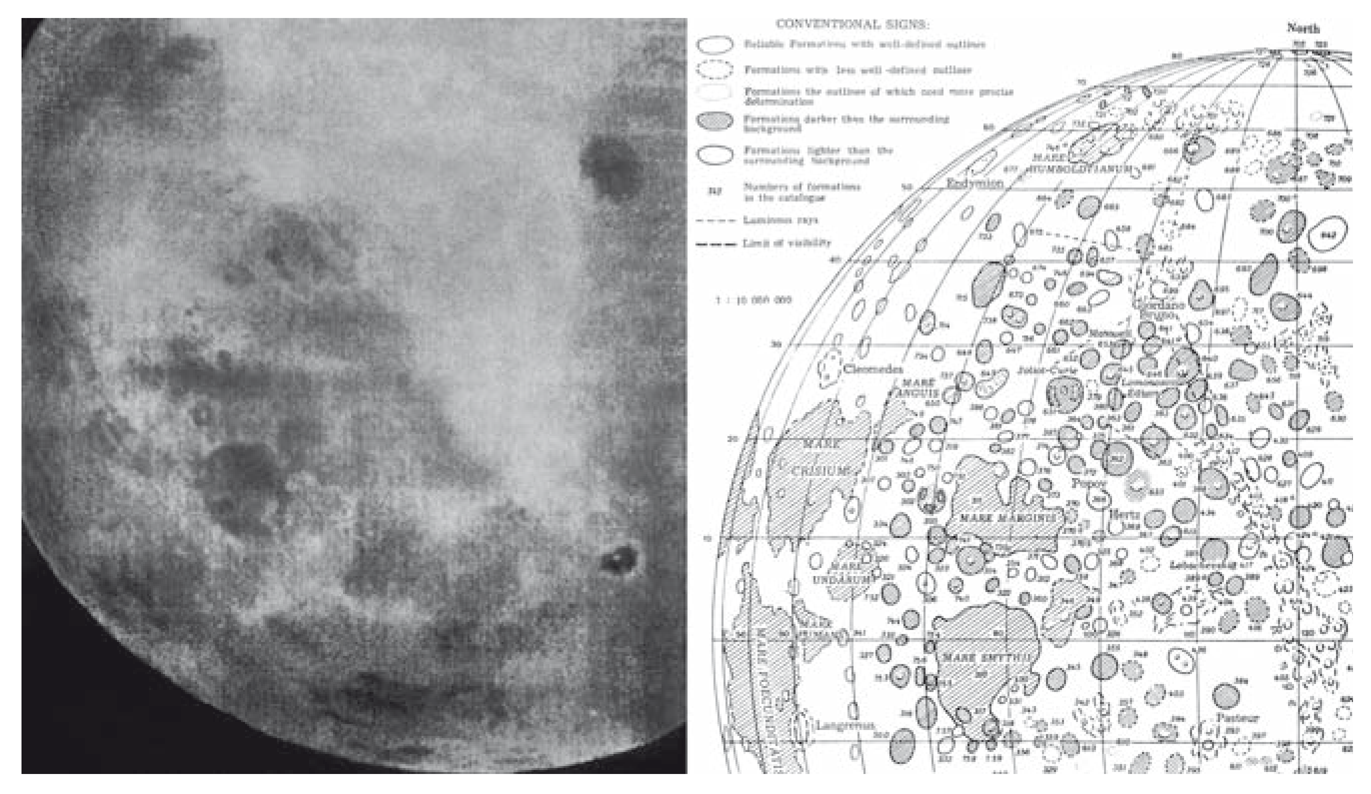
A pesar de todos los avances hasta la fecha, faltaba todavía más del 40 por ciento de la superficie lunar: 300 años después del comienzo



8. EL MAR DE LA HUMEDAD según aparecía en el *Atlas lunar consolidado* con luz solar oblicua (*izquierda*) y directa (*derecha*). En la parte superior de la imagen puede reconocerse el cráter Gassendi.



DER HIMMEL IM BILD. P. STRUKER, 1942 (*arriba*); INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO (*abajo*)/*Sterne und Weltraum*



9. LA CARA OCULTA DE LA LUNA según quedó retratada por vez primera por la sonda *Luna 3* (*izquierda*). A partir de las fotografías se confeccionó una primera carta del cuadrante noroeste (*derecha*).

de las observaciones telescópicas, nadie había visto aún la cara oculta de la Luna. Los viajes espaciales, que ya desde sus principios tuvieron a la Luna como objetivo, serían de gran ayuda al respecto.

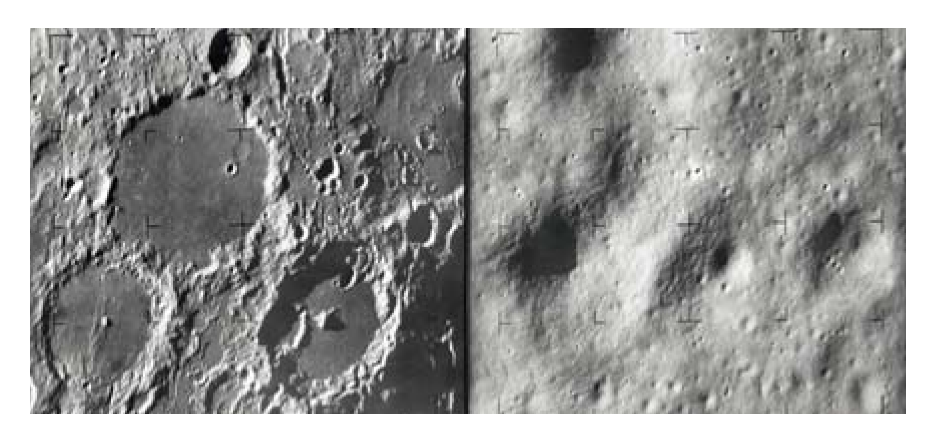
Al tiempo que trataba de mejorarse la calidad de las fotografías tomadas desde la Tierra, también comenzaron a desarrollarse programas espaciales para explorar y cartografiar la Luna. Sin duda, la carrera entre las superpotencias para llevar al primer hombre a la Luna supuso un acicate. En enero de 1959, la sonda soviética *Luna 1* sobrevolaba el satélite a corta distancia. Algo más tarde, *Luna 2* impactaba con éxito contra la superficie lunar y, en octubre del mismo año, *Luna 3* conseguía sobrevolar la cara oculta de la Luna.

Desde entonces, cerca de 70 misiones espaciales (tripuladas o no) han partido con destino a nuestro satélite. Numerosas sondas llevaron a cabo tareas selenográficas desde su órbita alrededor de la Luna, lo que permitió retratar su superficie con una exactitud sin precedentes. A ello hubieron de añadirse las primeras observaciones de la cara oculta del satélite, así como una mejora en las tomas relativas a las regiones del borde lunar.

La cámara de *Luna 3* envió a la Tierra las primeras fotografías, bastante rudimentarias, de la cara oculta de la Luna. Las imágenes mostraban unas formaciones similares a las de la cara visible. A partir de ellas se confeccionaron los primeros mapas, que, por su sencillez, recordaban a los del siglo XVII (*véase la figura 9*). Habrían de pasar seis años hasta que la sonda soviética *Zond 3* obtuviera mejores imágenes de la cara oculta.

Como es de suponer, para la preparación de misiones tripuladas, la cara posterior de la Luna revestía menor importancia que la visible, ya que era en este lado donde habrían de alunizar los primeros astronautas. Para evaluar los posibles lugares de alunizaje se requerían imágenes de alta resolución, las cuales servirían para determinar la naturaleza, aún desconocida, de la superficie de nuestro satélite.

Entre julio de 1964 y marzo de 1965, las tres últimas sondas *Ranger*, de la NASA, impactaron con éxito en el Mar de la Tranquilidad y en el cráter Alphonsus; poco antes del choque enviaron sus fotografías a la Tierra

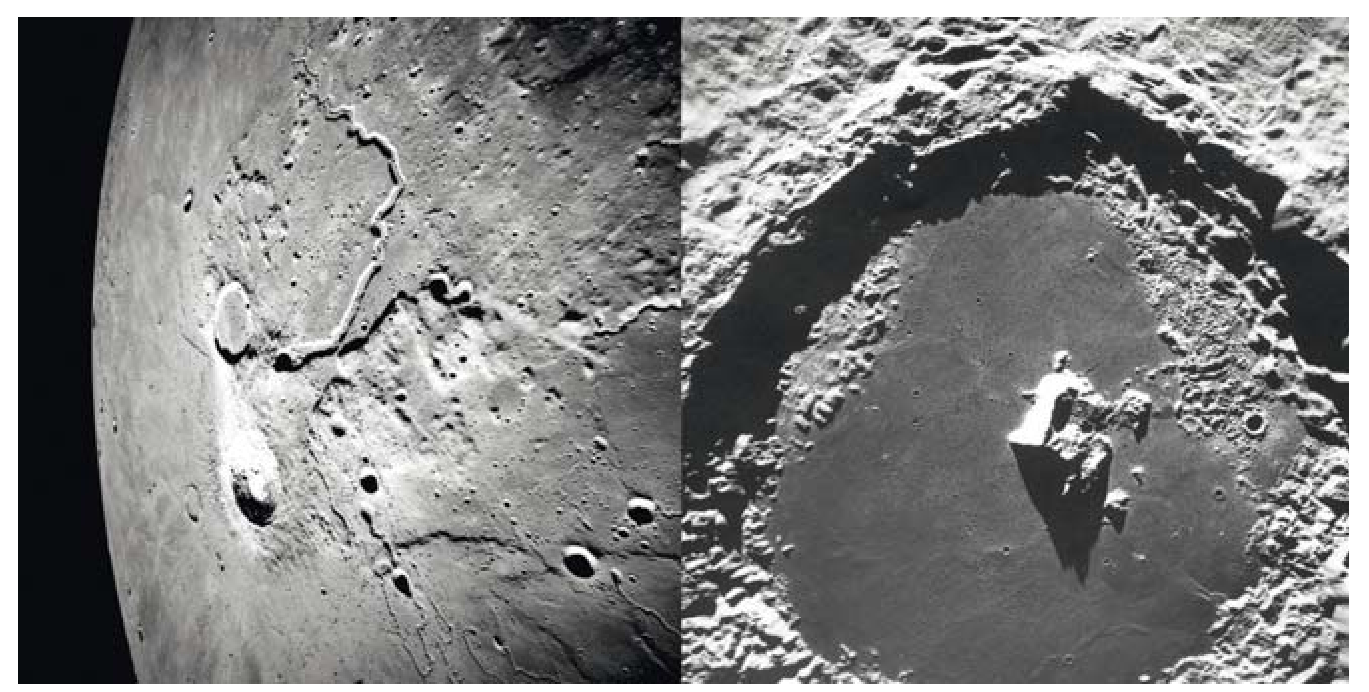


10. LA SONDA *RANGER 9* tomó estas dos fotografías del cráter Alphonsus poco antes de estrellarse contra la superficie lunar, el 24 de marzo de 1965. La primera fue tomada desde 2200 kilómetros y la segunda desde 13 kilómetros de altura.

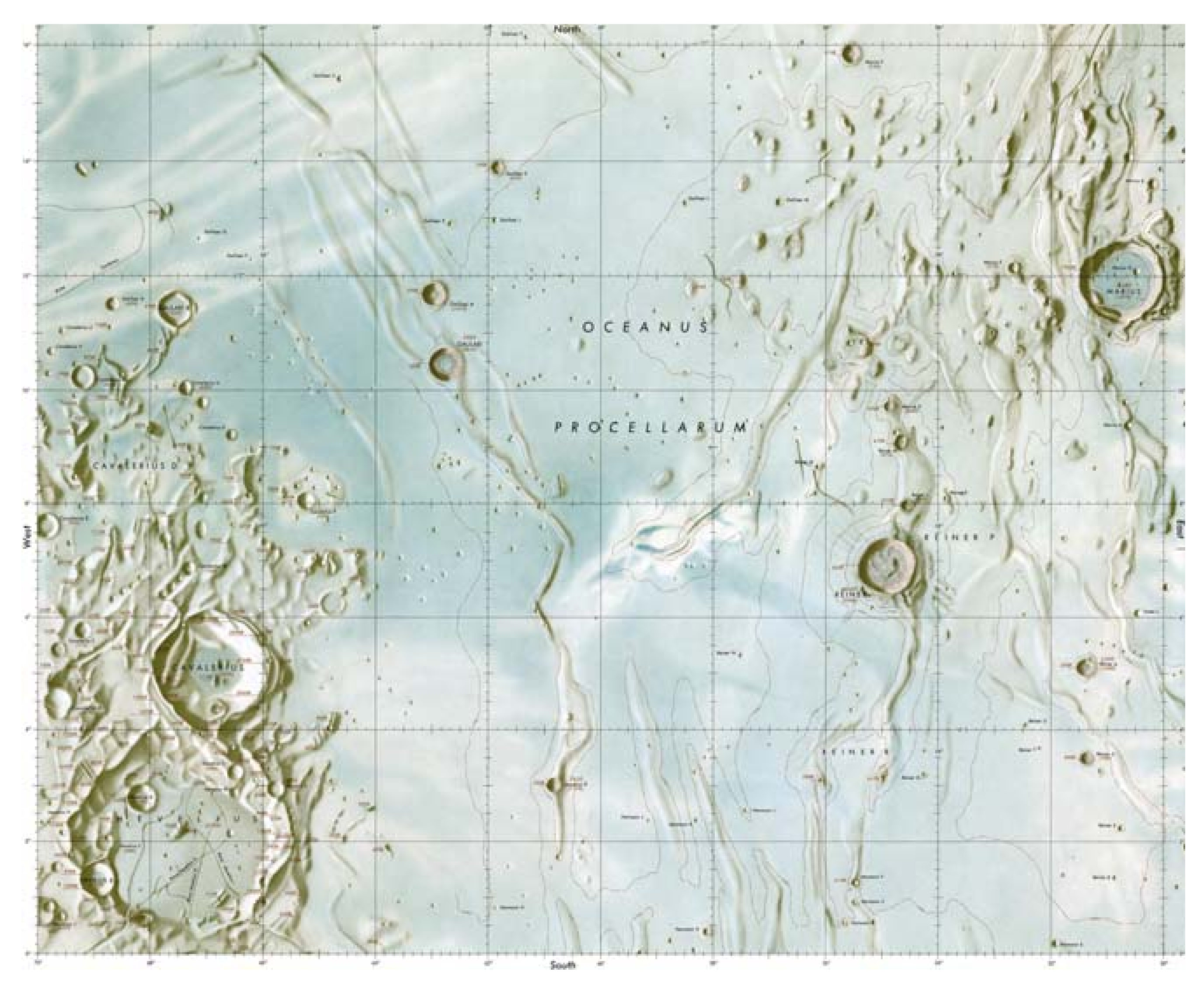
ATLAS DEL LADO OCULTO DE LA LUNA. ACADEMIA DE LAS CIENCIAS DE LA URSS, 1961 (*arriba*); INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO (*abajo*)/*Sterne und Weltraum*

11. EL MAR ORIENTAL, en la cara oculta de la Luna, fotografiado por el *Lunar Orbiter 4* con una cámara de resolución media (*izquierda*) y alta (*derecha*). Fotografías tomadas a 2720 kilómetros de altura.

12. LOS CRATERES ARISTARCO (*izquierda*) **Y ZIOLKOWSKI** (*derecha*), fotografiados con las cámaras métricas del *Apollo 15* y del *Apollo 17*, respectivamente.



INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO/ *Sterne und Weltraum*



13. CARTA N.º 56 DE LA *SERIE DE CARTAS LUNARES*, con el cráter Hevelius y el Océano de las Tormentas.

(*véase la figura 10*). Las últimas imágenes de la serie, obtenidas desde muy poca altura, permitían reconocer objetos de hasta 30 centímetros.

En conjunto, las sondas *Ranger* proporcionaron miles de fotografías de distinta calidad. Las mismas cubrían, sin embargo, sólo una pequeña parte de la superficie. Cartografiar de manera sistemática desde una proximidad inmediata exigía poner cámaras en órbita y, a poder ser, con una inclinación alta, para así cubrir también las regiones polares. Esta tarea recayó en las cinco sondas lunares (*Lunar Orbiter*) que, a partir de agosto de 1966, y durante un período de un año, fueron lanzadas cada pocos meses.

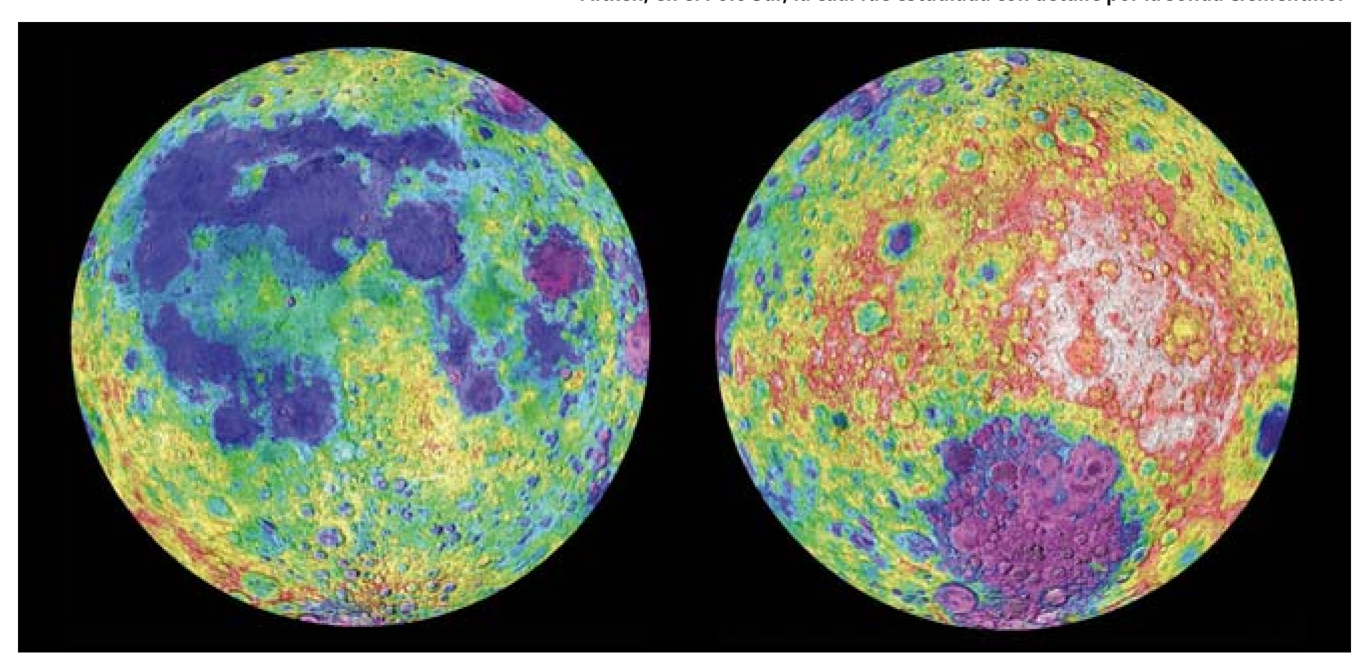
Las tres primeras sondas exploraron posibles lugares de alunizaje para las misiones Apolo, por lo cual sólo sobrevolaron regiones ecuatoriales. Por su parte, *Lunar Orbiter 4* y *5* también cartografiaron las zonas de latitudes altas. Sus cámaras estaban provistas de dos objetivos: uno de longitud focal normal, para fotos panorámicas, y otro de mayor longitud focal que permitiese captar detalles (*véase la figura 11*). A una órbita de unos 3000 kilómetros de altitud correspondía una resolución de entre 500 y 65 metros. Cuando completaron su misión, las sondas lunares habían cubierto el 99 por ciento de la superficie lunar con una resolución sin precedentes.

El punto culminante en la exploración del astro llegó a partir de 1968 con las primeras misiones Apolo tripuladas. En cada viaje, los astronautas se valieron de cámaras manuales para fotografiar formaciones lunares. Las sondas *Apollo 15*, *16* y *17* (las tres últimas) consiguieron, además, fotografías estandarizadas gracias a una cámara métrica fijada en el módulo de servicio (*véase la figura 12*).

En 1972, el Apolo 17 puso fin al programa lunar de la NASA. Hasta 1976, algunas sondas soviéticas siguieron explorando la Luna y enviaron a la Tierra muestras de su suelo. Tras ellas no hubo más vuelos lunares. Los resultados de las misiones de la NASA son accesibles desde la página web del Instituto Lunar y Planetario. Allí pueden encontrarse no sólo las fotos individuales de cada una de las sondas, sino también los mapas derivados de ellas y otros elaborados con tomas desde la Tierra. Además del *Atlas lunar consolidado*, se encuentran otros como la *Serie de cartas lunares* (*véase la figura 13*) y el *Atlas geológico de la Luna*, a escala 1:1.000.000 (*véase la figura 14*). En cuanto a mapas panorámicos, hay representaciones muy atractivas de las caras anterior y posterior de la Luna en proyección ortogonal, así como de las regiones polares a escala 1:5.000.000.

14. MAPA DEL *ATLAS GEOLOGICO DE LA LUNA* **en torno al cráter Copérnico. Los colores indican diferentes formaciones geológicas.**

15. CARTAS TOPOGRAFICAS de la cara visible (*izquierda*) y oculta (*derecha*) con indicaciones de altitud según los datos del altímetro láser de la misión *Clementine*. Las regiones en azul se hallan por debajo de la altura media y las coloreadas de rojo, por encima. En el lado oculto llama la atención la profunda cuenca Aitken, en el Polo Sur, la cual fue estudiada con detalle por la sonda *Clementine*.





En cuanto a la selenografía, tras el fin de las misiones lunares apenas quedan tareas dignas de mención. En particular, se considera concluida la tarea a la que, durante cuatro siglos, se enfrentaron los cartógrafos de la Luna. A día de hoy existen mapas de las caras anterior y posterior cuya precisión supera holgadamente la obtenida desde la superficie terrestre.

El siguiente paso significativo hubo de esperar hasta 1994, cuando la NASA y el Ministerio de Defensa de EE.UU. lanzaron la sonda *Clementine*. Esta portaba cuatro cámaras fotográficas que cubrían desde el ultravioleta al infrarrojo con el objetivo de fotografiar la superficie de la Luna en once dominios de longitud de onda. El análisis de la reflexión como función de la longitud de onda permite averiguar las propiedades mineralógicas del suelo. Ello posibilitó, por primera vez, la confección de cartas lunares temáticas. Además, a la sonda se incorporó un altímetro láser para tomar medidas topográficas de gran exactitud. Durante los tres meses que duró la misión, ésta cubrió desde su órbita toda la superficie lunar. Cuando, a comienzos de mayo de 1994, un defecto técnico provocó la pérdida de *Clementine*, la Luna ya había quedado cartografiada en su totalidad con una resolución media de 200 metros (*véase la figura 15*). Además, se había obtenido la primera representación topográfica homogénea basada en medidas directas de alturas.

La exploración de la Luna a día de hoy

El interés por nuestro satélite se ha visto renovado desde los comienzos del siglo XXI. En los últimos años, varias naciones han emprendido misiones lunares. La sonda *Smart-1*, de la Agencia Espacial Europea, orbitó en torno a la Luna desde noviembre de 2004 hasta septiembre de 2006. La misma logró fotografiar gran parte la superficie lunar y, sobre todo, sirvió para ensayar nuevas técnicas de vuelo.

La misión japonesa conocida como *Kaguya* y la sonda china *Chang'e-1* sobrevolaron el satélite entre 2007 y 2009. En 2008 se les unió la primera sonda lunar india, *Chandrayaan-1*, que completó su misión en 2009. Ese mismo año, la NASA lanzó su sonda de reconocimiento lunar (*Lunar Reconnaissance Orbiter*, aún en órbita) con el objetivo de explorar posible lugares de alunizaje para nuevas misiones tripuladas.

La futura selenografía se centrará en un detallado análisis químico y mineralógico. Hoy en día, el objetivo no es ya una representación lo más realista posible de la superficie lunar, sino la exploración de las propiedades de esa superficie.

El autor

Manfred Gottwald se doctoró en astronomía de rayos gamma en el Instituto Max Planck de Física Extraterrestre (MPE). Ha colaborado en las misiones espaciales de la Agencia Espacial Europea y del MPE. Actualmente trabaja en el Instituto de Métodos de Teledetección de la Agencia Espacial Alemana, donde está a cargo del instrumento de estudios atmosféricos SCIAMACHY.

Bibliografía complementaria

MAPPING OF THE MOON — PAST AND PRESENT. Z. Kopal y R. W. Carder en *Astrophysics and Space Science Library*, vol. 50D. Reidel Publishing, 1974.

MAPPING AND NAMING THE MOON. E. A. Whitaker. Cambridge University Press, 1999.

EPIC MOON. B. Sheehan y T. Dobbins. Willmann-Bell, 2001.

INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO: **http://www.lpi.usra.edu/**

AGRICULTURA VERTICAL

El cultivo en rascacielos urbanos consumiría menos agua y combustibles que la agricultura a cielo abierto, paliaría la degradación de las tierras y nos proveería de alimentos frescos

Dickson Despommier

CONCEPTOS BASICOS

- La agricultura moderna está arruinando el ambiente. Y no queda tierra cultivable suficiente para alimentar a una población de 9500 millones de personas, prevista para 2050.
- El cultivo en rascacielos acristalados reduciría drásticamente las emisiones de combustibles fósiles y permitiría reciclar las aguas negras de las ciudades, que ahora contaminan los acuíferos.
- Con 30 pisos de cultivos alzados sobre una hectárea se podría producir tanto como con 500 a cielo abierto, con una menor agresión al ambiente.
- Las instalaciones de hidroponía en servicio darán las directrices para las granjas verticales, que empiezan a ser tomadas en consideración por urbanistas de todo el mundo.

Los 6800 millones de habitantes del planeta dedican a la agricultura y la ganadería una extensión total equivalente a la de América del Sur. En las proyecciones demográficas se estima que la población mundial alcanzará los 9500 millones de individuos hacia 2050. Con los métodos agropecuarios actuales, para que cada persona disponga como mínimo de 1500 calorías diarias, será necesario aumentar la superficie cultivada en más de 500 millones de kilómetros cuadrados, aproximadamente la extensión de Brasil. Pero tal superficie de nuevas tierras cultivables, sencillamente, no existe. Ya decía el gran humorista Mark Twain: "Compra tierra; han dejado de producirla".

La agricultura, además, consume en regadíos alrededor del 70 por ciento del agua dulce disponible en el mundo, que se torna no potable por contaminación con fertilizantes, productos fitosanitarios, herbicidas y sedimentos. Si se mantiene la tendencia actual, pronto resultará imposible disponer de agua potable en ciertas regiones densamente pobladas. La agricultura también requiere enormes cantidades de combustibles fósiles: en EE.UU. representan alrededor del 20 por ciento de las gasolinas y gasóleos consumidos. Las correspondientes emisiones de gases de efecto invernadero constituyen, sin duda, un importante motivo de preocupación, así como el precio de los alimentos, vinculado al de los combustibles. Esa relación supuso que entre 2005 y 2008 se duplicara el coste de los alimentos en casi todos los lugares de mundo.

No pocos agrónomos siguen convencidos de que la solución reside en cultivos industriales más intensivos todavía, efectuados por un número cada vez menor de grandes consorcios agrícolas sumamente mecanizados, y en la siembra de especies de alto rendimiento, resultantes de modificaciones genéticas y de una agroquímica más poderosa. Pero aunque tal solución se pusiera en práctica, se trataría, en el mejor de los casos, de un remedio a corto plazo, porque los cambios en las condiciones climáticas no cesan de modificar el paisaje agrícola y frustran las más elaboradas estrategias. Poco después de que la Administración Obama asumiera sus funciones, Steven Chu, Secretario de Energía, advertía públicamente que el cambio climático podría borrar del mapa los cultivos californianos hacia finales de nuestro siglo.

Más todavía: si se prosigue la deforestación a gran escala para generar nuevas tierras de labor, el calentamiento global se acelerará aún más. Y los volúmenes mucho mayores de lixiviados y escorrentías agrícolas podrían muy bien crear suficientes "zonas muertas" acuáticas como para convertir a casi todos los estuarios e incluso parte de los mares en páramos estériles.

Por si todo lo anterior no fuera motivo suficiente de preocupación, las enfermedades asociadas a los alimentos (salmonela, cólera, *Escherischia coli*, shigella, por nombrar sólo algunas) son responsables de una gran mortalidad en todo el mundo. Mayor todavía es el problema de las parasitosis, como la malaria y la esquistosomiasis, que entrañan graves riesgos para la vida. Además, la práctica de utilizar a modo de abono las heces humanas está muy extendida en casi todo el sudeste asiático y en muchas partes de Africa y de América Central y del Sur (los abonos comerciales son demasiado caros), lo que facilita la difusión de

KENN BROWN *Mondolithic Studios*



El autor

Dickson Despommier es profesor de salud pública y microbiología en la Universidad de Columbia. Preside el proyecto Granja Vertical, que opera como central de intercambio de trabajos y desarrollos. Años atrás, cuando realizaba su posdoctorado en la Universidad Rockefeller, trabó amistad con René Dubois, investigador en ciencias agronómicas, que le introdujo en la ecología humana.

infecciones intestinales que afligen a 2500 millones de personas.

Se imponen, obvio es, cambios radicales. Bastaría adoptar una nueva estrategia para eliminar casi todos los males mencionados: desarrollar cultivos de interior. No en campo abierto, sino en explotaciones verticales, bajo condiciones rigurosamente controladas, en edificios muy altos erigidos en solares hoy baldíos de ciudades, así como en grandes invernaderos de dos o tres niveles en azoteas y tejados. De este modo sería posible la producción de alimentos durante todo el año, con un consumo hídrico notablemente inferior, menor generación de residuos, disminución del riesgo de enfermedades infecciosas, y sin maquinaria alimentada con combustibles fósiles ni necesidad de transporte desde zonas rurales distantes. Las granjas verticales podrían revolucionar nuestra alimentación y la de las generaciones venideras. Nuestros platos sabrían también mejor, al generalizarse el consumo de productos locales.

La idea que se describe en el presente artículo pudiera parecer, en una primera lectura, un tanto descabellada. Pero los ingenieros, los urbanistas y los agrónomos que han examinado con detalle las técnicas necesarias están convencidos de que la explotación agrícola vertical no sólo es factible, sino que debería ser sometida a prueba.

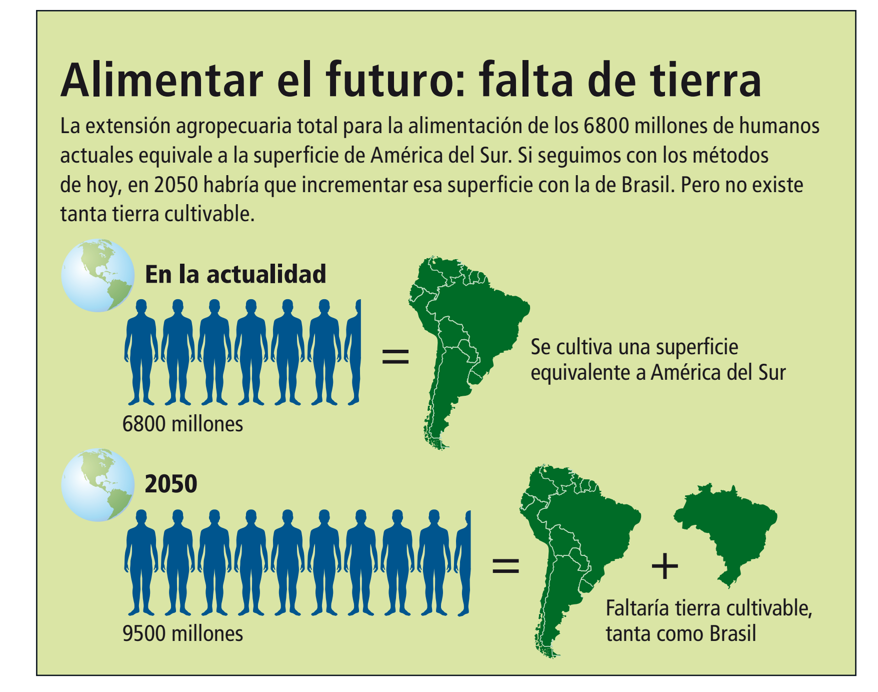
“No causes daño”

Al cultivar nuestro sustento en tierras antes ocupadas por bosques y prados vírgenes estamos destruyendo el planeta e instaurando las bases de nuestra propia desaparición. Lo menos que se podría exigir es una variante del principio hipocrático “No causes daño”. En el caso que nos ocupa, no sigamos perturbando la Tierra. La humanidad ha logrado imposibles. Desde los tiempos de Charles Darwin, a mediados del siglo XIX, una y otra vez, tras cada predicción malthusiana de fin del mundo, han llegado una serie de avances técnicos que nos han sacado del apuro. La diversificación de la maquinaria agrícola, los abonos y productos fitosanitarios más eficaces, la creación y desarrollo artificial de plantas de mayor rendimiento y resistencia a las enfermedades, sumadas a las vacunas y fármacos para las enfermedades animales más comunes, han dado lugar a más alimentos de los que necesitaba la población creciente.

Así ha sucedido hasta hace unos 25 o 30 años. Ya por entonces se iba haciendo evidente que en muchos lugares, los cultivos estaban esquilmando las tierras, excediendo con mucho su capacidad para soportar cultivos viables. Los productos agroquímicos habían destruido los ciclos naturales de renovación de nutrientes, que permiten a los ecosistemas vírgenes mantenerse a sí mismos. Es imperativo que nos orientemos hacia técnicas agrícolas más sostenibles.

Se atribuye al ecólogo Howard Odum el aforismo “La Naturaleza tiene todas las respuestas. ¿Qué pregunta tiene usted?” Héla aquí: ¿cómo podremos vivir bien y lograr al mismo tiempo la recuperación de los ecosistemas mundiales? Muchos expertos en climatología —desde funcionarios de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) hasta el paladín del ambientalismo sostenible, Wangari Maathai, premio Nobel de la Paz en 2004— concuerdan en que la forma más sencilla y directa de frenar el cambio climático consiste en dejar que las tierras de cultivo se conviertan de nuevo en las praderas o los bosques naturales que fueron en el pasado. Esos paisajes retiran del aire el dióxido de carbono, el más abundante de los gases de efecto invernadero. Dejemos de explotar las tierras y permitamos que el planeta recupere la salud.

Los ejemplos abundan. La zona desmilitarizada que media entre Corea del Norte y Corea del Sur, creada en 1953 tras la guerra de Corea, constituía una franja de cuatro kilómetros de ancho con tierras gravemente laceradas; hoy están regeneradas por completo, exuberantes y repletas de vida. El corredor baldío que separaba las dos Alemanias ha recuperado el verdor. El cuenco polvoriento estadounidense de los años treinta, convertido en páramo estéril por la sobreexplotación y la sequía, ha vuelto a ser una región cerealista sumamente productiva. Y la totalidad de Nueva Inglaterra, desforestada al



LAURIE GRACE





JACQUES DESCLOITRES *Modis Land Rapid Response Team/NASA/GSFC/Visible Earth (floración de fitoplancton);* DAVID R. FRAZIER *Getty Images (irrigación);* PAUL GREBLIUNAS *Getty Images (dispersión de plaguicida)*

1. LA AGRICULTURA IMPONE al ambiente una gravosa carga. Las escorrentías de fertilizantes acaban nutriendo grandes floraciones algales, que crean zonas marinas muertas (*izquierda; volutas azules y verdes*); los regadíos y vehículos malgastan enormes cantidades de agua y combustibles fósiles (*derecha, arriba*); los productos fitosanitarios contaminan los alimentos, las tierras y los acuíferos (*derecha, abajo*).

menos tres veces desde el siglo XVIII, ha vuelto a albergar grandes superficies de saludables bosques boreales y especies caducifolias.

La idea

Por muchas razones, pues, nuestra civilización, cada vez más numerosa y aglomerada, necesita nuevos métodos de producción agraria. Ahora bien, ¿representan los invernaderos urbanos dentro de rascacielos una opción viable?

Lo son, gracias, en parte, a que los cultivos bajo cubierta están convirtiéndose ya en algo normal. Tres técnicas (el riego por goteo, aeroponía e hidroponía) se han utilizado con éxito en distintos lugares del mundo. En el goteo, las plantas arraigan en canalones de material ligero e inerte, como la vermiculita, reutilizable durante años; unos tubitos que van de unas plantas a otras dejan gotear agua cargada de nutrientes justo en la base de cada tallo, con lo que se evita el enorme desperdicio de agua que se produce en el riego tradicional. En la aeroponía, desarrollada en 1982 por K. T. Kubick y perfeccionada después por científicos de la NASA, las plantas penden en una atmósfera infusa con vapor de agua y nutrientes; tampoco existe aquí la necesidad de suelo.

Se atribuye al agrónomo William F. Gericke la invención de la hidroponía moderna hacia 1929. Las plantas se sostienen de modo que sus raíces yacen sobre canalones sin tierra, por los que circula agua con nutrientes en disolución. Durante la Segunda Guerra Mundial, se cultivaron por hidroponía unos cuatro millones de kilogramos de hortalizas en las islas del Pacífico Sur, para el consumo de las fuerzas aliadas desplegadas allí. En nuestros días, los invernaderos hidropónicos demuestran las ventajas de los cultivos a cubierto: cosechas a lo largo de todo el año, resguardo de sequías e inundaciones que a menudo arruinan a toda una comarca, maximización de rendimientos al optimizarse las condiciones de crecimiento y maduración, y minimización de patógenos humanos.

Y aún más importante, la hidroponía le permite al agricultor elegir dónde va situar su explotación, sin tener que preocuparse de las condiciones ambientales externas, como la naturaleza de los suelos, o las características de las precipitaciones y temperaturas. Los cultivos de interior pueden desarrollarse en cualquier lugar donde existan suministros adecuados de agua y energía. Existen instalaciones hidropónicas de dimensiones considerables en el Reino Unido, Holanda, Dinamarca, Alemania, Nueva Zelanda y otros países. Y en EE.UU., un notable ejemplo: las 80 hectáreas de la explotación Eurofresh, en el desierto de Arizona, producen grandes cantidades de tomates, pepinos y pimientos de primera calidad doce meses al año.

La mayor parte de estas instalaciones se ubican, no obstante, en zonas semirrurales, donde se puede encontrar suelo a precios razonables. Pero el transporte de los alimentos a gran distancia añade costes, consume combustibles fósiles, emite al aire dióxido de carbono y genera desechos. El traslado de los cultivos de invernadero a estructuras de gran altura, en los aledaños de las ciudades, contribuiría a solucionar estos problemas. Mi idea se basa

en la construcción de unos edificios de unos 30 pisos de altura, que ocupen toda una manzana de la ciudad. A esa escala, los cultivos verticales podrían lograr la sostenibilidad de la vida urbana: las aguas residuales del municipio, recicladas, servirían para el riego; y los residuos sólidos, junto con las partes no comestibles de los vegetales, se incinerarían para producir el vapor que accionara turbinas y generara energía eléctrica para la granja. Las técnicas actuales permiten el cultivo en interior de gran variedad de vegetales comestibles. En centros de acuicultura contiguos se podrían criar peces, gambas y moluscos.

El salto a los cultivos en altura podría partir de ayudas a emprendedores y del apoyo de centros de investigación de patrocinio público. Los consorcios entre universidades y compañías como Monsanto, Cargill, Archer Daniels Midland e IBM podrían también cubrir los gastos. Se sacaría provecho del enorme talento existente en las escuelas de agricultura, arquitectura e ingeniería; se podría empezar con prototipos, de unas cinco plantas de altura y unos 2500 metros cuadrados de superficie. Esas instalaciones constituirían "campos experimentales" para doctorandos, ingenieros y otros investigadores; en ellas se efectuarían los ensayos necesarios para lograr una explotación agrícola plenamente funcional. Las construcciones más modestas en las azoteas de complejos de viviendas, hospitales y escuelas podrían servir también de banco de pruebas. Existen ya instalaciones científicas en numerosas escuelas de agronomía, entre ellas, las de la Universidad de California en Davis, la Universidad estatal de Pensilvania, la Universidad Rutgers, la Universidad estatal de Michigan y muchas escuelas y universidades de Europa y Asia. Una de las más famosas es el Centro de agricultura en ambiente controlado de la Universidad de Arizona, que dirige Gene Giacomelli.

La integración de la producción de alimentos en la vida urbana supondría un paso de gigante para hacer sostenible la vida en las ciudades. Crecerían nuevas industrias y surgirían en la ciudad puestos de trabajo no imaginados: viveristas, cultivadores y cosechadores. Y la naturaleza podría recuperarse de las lesiones que le hemos infligido; los agricultores tradicionales habrían de ser incentivados para que cultivaran prados y bosques, y se les compensaría por el consiguiente secuestro de carbono. En última instancia, la tala selectiva se convertiría en la norma para una enorme industria maderera, al menos en toda la mitad oriental de EE.UU.

TECNICAS DE CULTIVO

Tres técnicas para la agricultura vertical.

AEROPONIA
Las plantas se sostienen de modo que las raíces penden en aire infuso con vapor de agua y nutrientes. Apta para tubérculos (patatas, zanahorias).

HIDROPONIA
Las plantas se sostienen de forma que sus raíces permanecen en canalones abiertos, por los que se hace circular continuamente agua con nutrientes en disolución. Adecuada para hortalizas (tomates, espinacas) y frutos de baya.

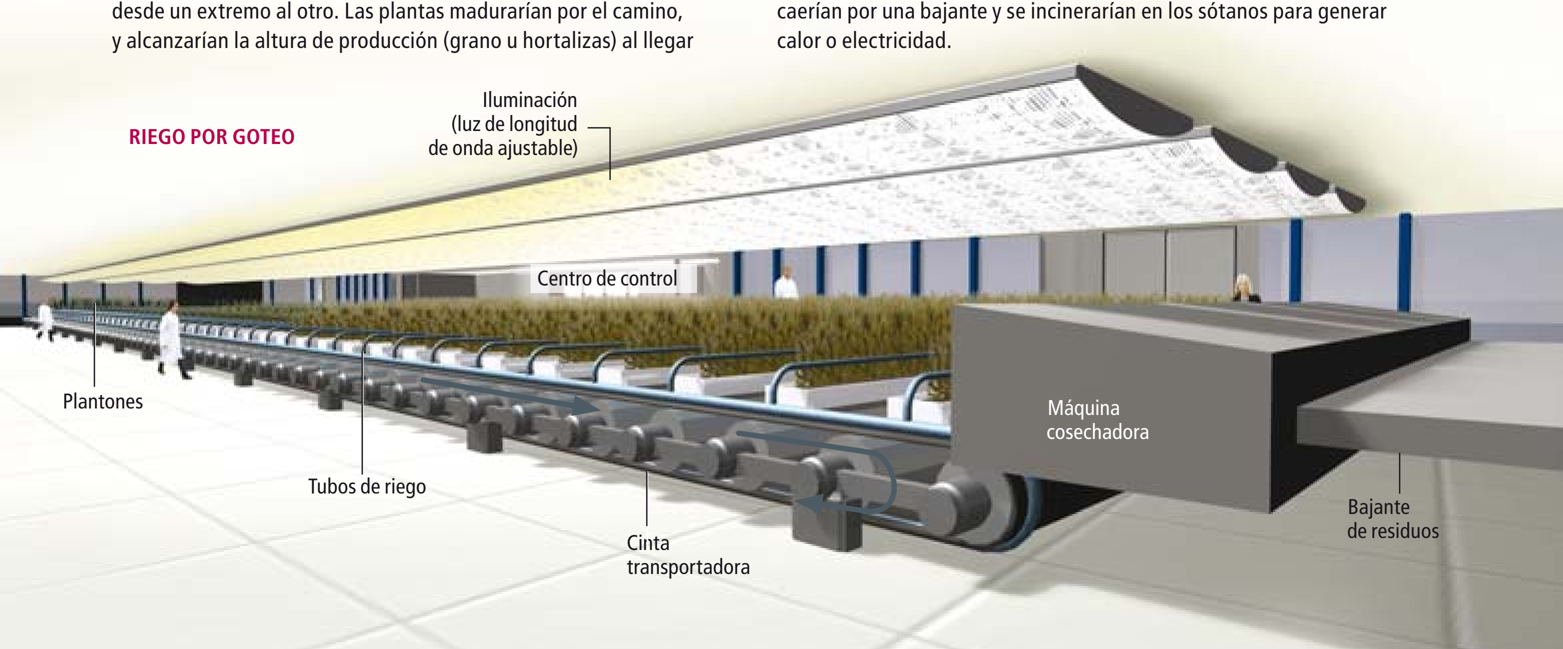
IRRIGACION POR GOTEO
Las plantas son cultivadas en canalones de material ligero e inerte, como la vermiculita, reutilizable varios años. Pequeñas conducciones tendidas en la superficie dejan gotear agua cargada de nutrientes en el punto exacto de la base de cada tallo. Adecuada para cereales (trigo, maíz).

Problemas de orden práctico

En los últimos años he disertado en varias ocasiones sobre agricultura vertical. En la mayoría de los casos, el público plantea dos grandes problemas de orden práctico. En primer lugar, los escépticos se preguntan sobre la viabilidad económica de tal proyecto, en vista de la inflación de los precios inmobiliarios en ciudades como Chicago, Londres o París. Aunque las zonas comerciales del centro resulten inasequibles, en todas las grandes ciudades existen numerosos emplazamientos menos codiciados que podrían ser objeto de

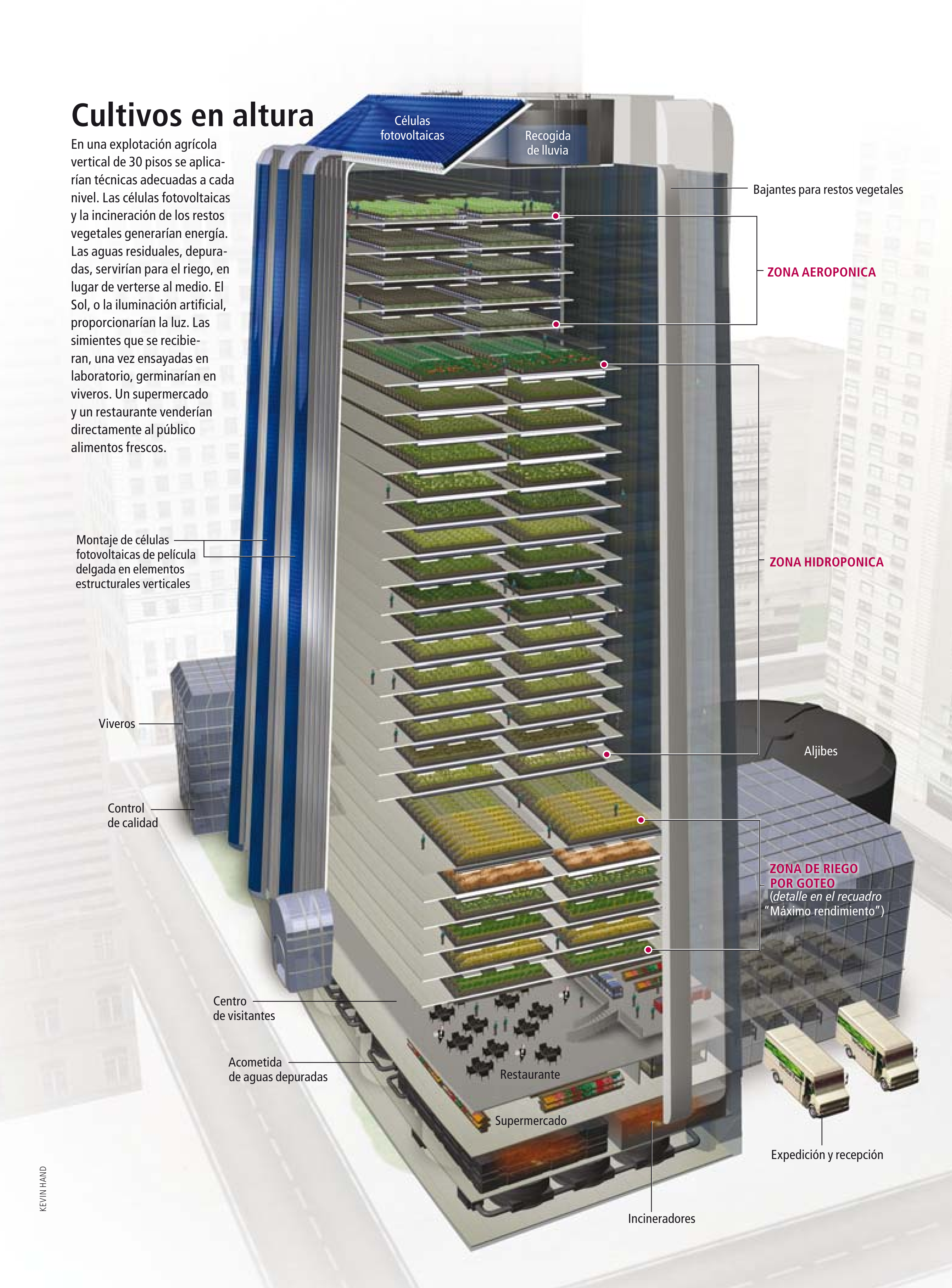
MAXIMO RENDIMIENTO

En casi todos los niveles de una explotación agrícola vertical, una cinta transportadora iría trasladando automáticamente los plantones desde un extremo al otro. Las plantas madurarían por el camino, y alcanzarían la altura de producción (grano u hortalizas) al llegar a una cosechadora. La irrigación y la iluminación se calibrarían para optimizar el crecimiento en cada estadio. Los desechos no comestibles caerían por una bajante y se incinerarían en los sótanos para generar calor o electricidad.



Cultivos en altura

En una explotación agrícola vertical de 30 pisos se aplicarían técnicas adecuadas a cada nivel. Las células fotovoltaicas y la incineración de los restos vegetales generarían energía. Las aguas residuales, depuradas, servirían para el riego, en lugar de verterse al medio. El Sol, o la iluminación artificial, proporcionarían la luz. Las simientes que se recibieran, una vez ensayadas en laboratorio, germinarían en viveros. Un supermercado y un restaurante venderían directamente al público alimentos frescos.







2. LAS GRANJAS EUROFRESH, que ocupan unas 80 hectáreas en Wilcox, Arizona, llevan más de 10 años cultivando tomates, pepinos y pimientos por hidroponía. Ello demuestra la eficacia de esta técnica y de los cultivos de interior a gran escala.

proyectos que revertirían en ingresos muy necesarios.

En la ciudad de Nueva York, la antigua base naval Floyd Bennett Field, con más de cinco kilómetros cuadrados, permanece sin utilizar tras ser abandonada en 1972. Otro gran solar es Governors Island, una parcela de 43 hectáreas en el puerto de Nueva York, que el gobierno estadounidense devolvió hace poco a la ciudad. La estación ferroviaria de la calle 33 representa otra superficie infrautilizada en el corazón de Manhattan. Están, además, los solares de siempre y los edificios en ruinas, repartidos por toda la ciudad. Hace algunos años, mis doctorandos exploraron los cinco grandes barrios de Nueva York; identificaron al menos 120 lugares abandonados, muchos con posibilidad de instalar cultivos verticales para quienes más lo necesitan, a saber, los residentes desfavorecidos del centro urbano. En todas las ciudades del mundo existe un sinfín de lugares similares. Y, por supuesto, hay tejados y azoteas por doquier.

Los mismos argumentos simplistas que a menudo se utilizan para rechazar los cultivos verticales permiten, de hecho, demostrar su viabilidad. Una manzana típica de Manhattan ocupa algo más de una hectárea. Los críticos aducen que un edificio de 30 pisos ofrecería sólo entre 30 y 40 hectáreas, una superficie pequeña en comparación con las explotaciones agrícolas a cielo abierto. Pero en una granja vertical se puede cultivar todo el año. Las lechugas se pueden cosechar cada seis semanas; los cultivos de crecimiento lento, como el trigo o el maíz (que deben esperar de tres a cuatro meses entre la siembra y la siega) se podrían cosechar tres o cuatro veces al año. Además, las plantas de maíz enano, desarrolladas para la NASA, ocupan mucho menos espacio que las de maíz ordinario, y crecen sólo hasta una altura de unos 60 a 90 centímetros. También el trigo enano es de escasa alzada, aunque de enorme valor nutritivo. Las plantas podrían cultivarse más juntas, con lo que se duplicaría el rendimiento por hectárea, y en cada piso se podrían cultivar dos o tres niveles de plantas enanas. Se están usando ya soportes “apiladores” para ciertos cultivos hidropónicos.

Combinemos estos factores en un cálculo rápido. Supongamos que cada piso de una explotación vertical ofrece cuatro temporadas de cultivo, con una densidad doble de plantas y dos niveles por piso, un coeficiente multiplicador de 16 (= 4 × 2 × 2). Resultaría que un edificio de 30 plantas que ocupase una manzana podría equivaler, en producción anual, a unas 450 o 500 hectáreas (30 pisos × 1 ha × 16) de cultivo en el campo. De igual modo, un cuarto de hectárea (2500 metros cuadrados) de tejados o azoteas en grandes hospitales o centros de enseñanza, con cultivos a un solo nivel, podría suponer unas cuatro hectáreas anuales de hortalizas para su propio abastecimiento. Claro está que el crecimiento podría acelerarse aún más con iluminación durante las 24 horas del día, pero por ahora no contemos con eso.

Esta cifra puede incrementarse gracias a otros factores. Las sequías y las riadas suponen todos los años la ruina de comarcas agrícolas enteras, especialmente en el Medio Oeste de EE.UU. Otros estudios indican, además, que el 30 por ciento de la cosecha se pudre o se parasita durante el almacenamiento y el transporte, pérdidas que se reducirían al mínimo en las granjas de ciudad, pues los alimentos se venderían casi al momento y en el propio punto de producción al existir demanda sobrada. Y no olvidemos que se habrían eliminado en gran medida las terribles heridas que causan al medio los cultivos a cielo abierto: escorrentías de fertilizantes, emisiones de combustibles fósiles y deforestaciones.

La segunda pregunta planteada concierne a los aspectos económicos del suministro de agua y energía. En este caso, la ubicación resulta fundamental. Las granjas verticales de Islandia, Italia, Nueva Zelanda, sur de California y algunas regiones de Africa oriental aprovecharían la

CORTESIA DE HOLLIS GRAPHICS (*invernadero*); CORTESIA DE EUROFRESH FARMS (*vista de pájaro*)

abundante energía geotérmica de esas regiones. En desiertos intensamente insolados (sudoeste de EE.UU., Oriente Medio, muchas partes de Asia Central) se utilizarían estructuras de dos o tres pisos, de unos 50 o 100 metros de anchura y con varios kilómetros de longitud, que sacarían el máximo partido a la luz natural para hacer crecer los vegetales y generar energía fotovoltaica. Las regiones favorecidas por vientos constantes (muchas zonas costeras, el Medio Oeste de EE.UU.) capturarían la energía eólica. Y en todos los casos, de la incineración de los desechos vegetales se obtendría electricidad o biocombustibles.

Existe otro recurso sumamente valioso, muy a menudo olvidado. De hecho, todas las comunidades invierten gran cantidad de energía y dinero sólo para deshacerse de él. Se trata de los residuos líquidos urbanos o aguas negras. Los habitantes de Nueva York producen diariamente unos cuatro millones de metros cúbicos de aguas residuales. La ciudad dedica enormes recursos a depurarlas, y vierte después al río Hudson las "aguas grises" resultantes. Esas aguas grises podrían destinarse, en cambio, a la irrigación de los cultivos verticales. Por otra parte, también podrían incinerarse los subproductos sólidos, ricos en energía. Una deposición humana típica, de unos 250 gramos, incinerada en una bomba calorimétrica produce unas 300 kilocalorías. Por extrapolación a los ocho millones de habitantes de Nueva York, resultaría teóricamente posible obtener de estos residuos unos 100 millones de kilowatt-hora anuales, solamente de las heces humanas, cantidad suficiente para abastecer cuatro granjas de 30 pisos cada una. Si todo este material se convirtiera en agua utilizable para regar y en energía, la vida urbana se tornaría mucho más eficiente.

Las inversiones serán elevadas al principio, mientras se experimenta y aprende la mejor manera de integrar los distintos sistemas necesarios. Por eso es preciso construir inicialmente prototipos de tamaño reducido, al igual que con cualquier aplicación de una técnica nueva. La producción *in situ* de energía renovable no debería resultar más costosa que los onerosos combustibles fósiles para las grandes máquinas cultivadoras que aran, siembran y cosechan (y emiten grandes volúmenes de contaminantes y gases de efecto invernadero). Mientras no se adquiera experiencia operativa, difícilmente se podrá pronosticar la rentabilidad de una explotación agrícola vertical. El otro objetivo, evidentemente, consiste en conseguir productos más económicos que los que ofrecen los supermercados, lo que sería factible, ya que los productos cultivados no deben transportarse a gran distancia.

OBSTACULOS

Varias dificultades sofocarían la difusión de la agricultura urbana, pero todas ellas podrían resolverse mediante las siguientes acciones.

Reclamar solares abandonados y azoteas para destinarlos a agricultura de invernadero.

Convertir en aguas de riego las aguas negras urbanas.

Proporcionar energía barata para la circulación de agua y aire.

Convencer a urbanistas, inversionistas, inmobiliarias, científicos e ingenieros para que construyan prototipos de estas explotaciones, con el fin de estudiar y resolver los problemas concretos que vayan surgiendo.

Bibliografía complementaria

OUR ECOLOGICAL FOOTPRINT: REDUCING HUMAN IMPACT ON THE EARTH. Mathis Wackernagel y William Rees. New Society Publishers, 1996.

CRADLE TO CRADLE: REMAKING THE WAY WE MAKE THINGS. William McDonough y Michael Braungart. North Point Press, 2002.

AZOTEAS VERDES. CUBIERTAS CON VIDA. Mark Fischetti en *Investigación y Ciencia*, n.º 382, págs. 92-93; julio 2008.

UNIVERSITY OF ARIZONA CONTROLLED ENVIRONMENT AGRICULTURAL CENTER: http://ag.arizona.edu/ceac

VERTICAL FARM: FEEDING THE WORLD IN THE 21ST CENTURY. Dickson Despommier. Thomas Dunne Books/St. Martin's Press, 2010.

Deseo

Han transcurrido cinco años desde que publiqué en la red algunas ideas aproximativas sobre la agricultura vertical (www.verticalfarm.com). Desde entonces, arquitectos, ingenieros, diseñadores y organizaciones de la línea tradicional le han ido prestando creciente atención. En la actualidad, son muchos los constructores, inversionistas, alcaldes y urbanistas interesados, y han manifestado su claro deseo de construir un prototipo de granja vertical. Se han puesto en contacto conmigo urbanistas de Nueva York, Portland (Oregón), Los Angeles, Las Vegas, Seattle, Surrey, Columbia Británica, Toronto, París, Bangalore, Dubai, Abu Dhabi, Incheon, Shanghai y Pekín. El Instituto de Tecnología de Illinois está elaborando un plan detallado para Chicago.

Todas esas personas son conscientes de la urgencia de crear una fuente fiable de alimentos para la próxima generación. Plantean difíciles cuestiones sobre costes, retornos de inversión, consumos hídricos y energéticos, y posibles rendimientos de los cultivos. Les preocupa la corrosión de los elementos estructurales por la humedad, la energía necesaria para bombear agua y aire a todas partes, y la economía de escala. La solución de todos estos problemas exigirá una vasta participación de ingenieros, arquitectos, agrónomos expertos en invernaderos e instituciones financieras. Es posible que los ingenieros y economistas en ciernes deseen abordar estos obstáculos.

La iniciativa sobre las explotaciones agrícolas verticales, accesible en la red, se encuentra ahora en manos del público. Su éxito o fracaso dependerá sólo de quienes construyan las granjas prototipo, y del tiempo y esfuerzo que les dediquen. Biosfera 2, un desafortunado proyecto de ecosistema cerrado construido en las afueras de Tucson, en Arizona, habitado inicialmente por ocho personas en 1991, ofrece el mejor ejemplo de una mala actuación. Se trataba de una construcción demasiado grande, que carecía de proyectos previos contrastados y no tuvo en cuenta el oxígeno absorbido durante el curado del hormigón de sus enormes cimientos. (La Universidad de Arizona tiene ahora los derechos para evaluar de nuevo las posibilidades de esa estructura.)

Los proyectistas de la agricultura en vertical deben evitar ese tipo de errores. A este respecto, las noticias son halagüeñas. Según los principales expertos en ecoingeniería, como Peter Head, director de planificación global en Arup, una firma londinense de proyectos e ingeniería, la construcción de una explotación urbana eficiente y de grandes dimensiones no exige el desarrollo de técnicas nuevas. Muchos entusiastas preguntan: "¿A qué estamos esperando?".

¿Es la teoría de cuerdas una ciencia?

CONCEPTOS BASICOS

- La teoría de cuerdas parece requerir la existencia de numerosos universos. Sin embargo, la verificación experimental de la existencia de esos mundos se antoja imposible.
- Aceptar la idea de un multiverso supone renunciar al principio de falsabilidad de Karl Popper. El principio antrópico, en cambio, explicaría por qué en nuestro universo las constantes de la naturaleza son tales que permiten la existencia de vida.
- Otras predicciones de la teoría sí resultan falsables. Entre ellas se encuentra la existencia de las dimensiones espaciales adicionales que exige la teoría de cuerdas.

Si bien alguna vez el ser humano fue considerado el culmen de la creación, en los últimos siglos ha ido perdiendo posiciones. Primero fue Copérnico quien lo expulsó del centro del universo. Después, Charles Darwin lo devolvió al mundo animal. Hoy sabemos que nuestro sistema solar no ocupa más que un insignificante rincón en la Vía Láctea, una galaxia común. Y, por si fuera poco, algunos físicos teóricos afirman que nuestro universo quizá no sea sino uno más entre innumerables mundos paralelos.

Según la teoría de cuerdas, esos otros universos presentarían características diferentes al nuestro: albergarían otro tipo de partículas elementales, se regirían por otras fuerzas fundamentales y, con gran probabilidad, en muy pocos de ellos habría observadores que se cuestionasen la estructura del cosmos. Ahora bien, si preguntamos a los teóricos de cuerdas cuándo podremos observar dichos universos, nos responderán que el asunto se muestra más que difícil.

De manera sorprendente, y a pesar de tales afirmaciones, para algunos la teoría no parece perder un ápice de credibilidad. Es más: se halla implantada con tal firmeza que, para la mayoría de los físicos teóricos, constituye la principal candidata a convertirse en la ansiada "teoría del todo". Según la teoría de cuerdas, los constituyentes fundamentales del universo no son partículas, sino minúsculos objetos unidimensionales que podemos imaginar como "cuerdas" en vibración. Los modos de vibración (las notas, si hablásemos de un instrumento musical) se manifestarían como diferentes partículas elementales. Si en realidad el mundo se compone de cuerdas, es posible que, algún día, la teoría llegue a describir todos los fenómenos físicos no sólo de nuestro universo, sino también de otros.

¿Una renuncia sin crítica?

Pero, ¿cómo es posible que haya físicos que, sin crítica alguna, renuncien a aplicar el criterio de falsabilidad exigido por Karl Popper (1902-

Los críticos la acusan de hacer afirmaciones que escapan a toda verificación empírica. Sin embargo, la teoría de cuerdas promete convertirse, más que ninguna otra, en la "teoría del todo". Es posible que su desarrollo obligue a un cambio paulatino de paradigmas en la física

Dieter Lüst



1994) a toda teoría física? ¿Cómo pueden tomar en serio conclusiones a las que sólo se llega mediante el formalismo matemático y nunca a través de la observación de la naturaleza?

La respuesta reside, sobre todo, en el enorme potencial de la teoría. La teoría de cuerdas ha sido la primera en poner bajo un mismo techo la gravedad y las fuerzas electromagnética, fuerte y débil. Hasta ahora, la gravedad quedaba descrita por la teoría de la relatividad general. Esta, en gran acuerdo con las observaciones, permite calcular procesos ocurridos incluso pocos instantes después de la gran explosión. También permite predecir el destino de nuestro universo en un futuro lejano. Las otras tres fuerzas se hallan integradas en el modelo estándar de la física de partículas. El mismo se fundamenta en las leyes de la mecánica cuántica, formuladas durante el primer tercio del siglo XX.

De acuerdo con lo exigido por Popper, ambas teorías realizan predicciones falsables. Cada una de ellas es válida dentro de un amplio dominio. No obstante, es un hecho que ambas son mutuamente excluyentes. Esto se pone de manifiesto al considerar condiciones físicas extremas, como las que se dan a escalas diminutas o en el interior de los agujeros negros. Así, la física teórica se encuentra ante una disyuntiva, ya que su objeto consiste en hallar, de manera reduccionista, un principio común a todos los contextos físicos.

Por su parte, la teoría de cuerdas, cuyos orígenes se remontan al decenio de los años sesenta del siglo pasado, cree haber encontrado dicho principio. Gracias a ella, el camino hacia una descripción unificada de las cuatro fuerzas fundamentales se antoja más transitable.

Predecir en vez de medir

Hasta ahora, el modelo estándar ha resistido todas las exigencias impuestas por el principio de falsabilidad. Sin embargo, existen en dicho modelo numerosos parámetros libres, como las masas de las partículas elementales o la constante que rige la intensidad de la

1. SEGUN LA TEORIA DE CUERDAS, nuestro universo podría ser sólo uno de tantos. Es probable que tales universos nunca lleguen a entrar en contacto unos con otros, por lo que su existencia resultaría imposible de demostrar.

KRISTIN RIEBE/*Spektrum der Wissenschaft*

El autor

Dieter Lüst es profesor de física matemática y teoría de cuerdas en la Universidad Ludwig Maximilian (LMU), director del Instituto de Física Max Planck y ponente en el "Curso superior de física teórica y matemática" de la LMU y de la Universidad Técnica de Múnich. En 2000 recibió el premio Leibniz de la Sociedad Científica Alemana y fue aceptado como miembro de la Academia de las Ciencias de Berlín-Brandemburgo. Su investigación se centra en la teoría de cuerdas y en los problemas de la gravitación y la teoría de campos.
Este artículo ha contado con la colaboración de **Vera Spillner**, quien estudió física teórica en Heidelberg, Minneapolis y Berlín. Actualmente realiza su doctorado en filosofía en la Universidad de Bonn.

interacción electromagnética: el modelo estándar no dice nada sobre por qué su valor es el que observamos y no otro. Pero se cree que la teoría de cuerdas logrará, algún día, *predecir* dichas magnitudes; algo que, sin duda, cimentaría con gran solidez su estatus de teoría fundamental.

Sin embargo, cada vez se alzan más voces críticas. Desde luego, quien no renuncie al principio de falsabilidad de Popper nunca podrá comulgar con la teoría de cuerdas. En particular, la teoría predice la existencia de dimensiones extra, que añaden seis dimensiones espaciales al espaciotiempo de cuatro dimensiones que nos es dado percibir [*véase* "Dimensiones extra", por George Musser; Investigación y Ciencia, agosto de 2010]. Pero es posible que no lleguemos a observar dichas dimensiones. A ello hay que sumar los universos paralelos. De hecho, la teoría de cuerdas no sólo admite la existencia de múltiples universos, sino que, además, parece exigirlos.

Sin embargo, la teoría carece de toda demostración de la existencia de esos mundos adicionales. Es por ello que sus detractores acusan a la teoría del multiverso de hacer, más que física, metafísica. Ante tal dilema, nos enfrentamos a un cambio de paradigma que lleva sugiriéndose desde hace años: el referente a las exigencias que debe satisfacer cualquier teoría física. Ello implica cuestionar el principio de falsabilidad de Popper y recurrir a otros argumentos filosóficos, como el principio antrópico.

Desde cierto punto de vista, la teoría de cuerdas constituye una teoría en el mismo sentido en que lo son el modelo estándar o la relatividad: se basa en un conjunto de ecuaciones que determinan magnitudes físicas, como la energía del vacío. Y como rasgo particular, difiere de las teorías ya establecidas y exige, por razones de consistencia matemática, que el mundo posea nueve dimensiones espaciales y una temporal.

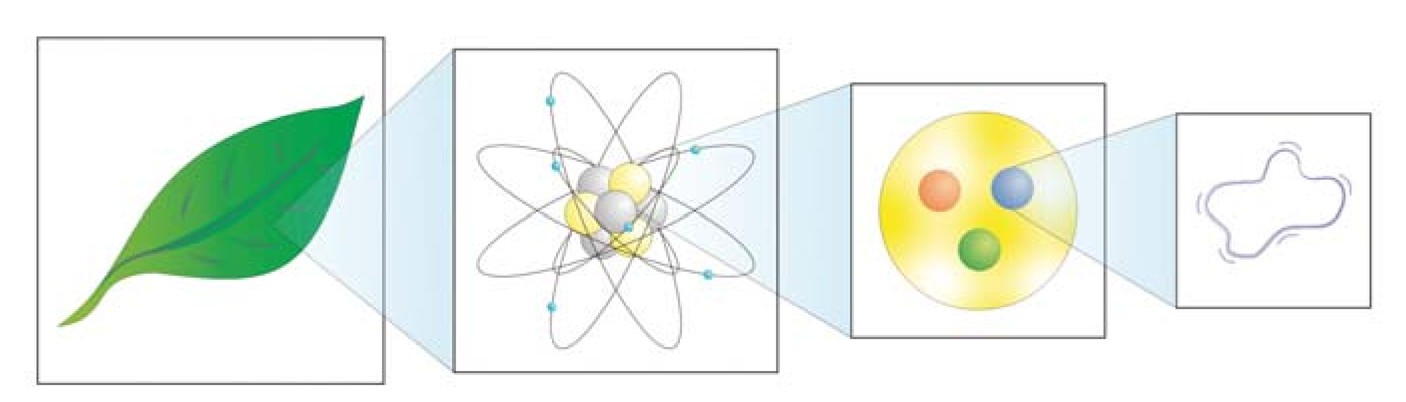
Hacia mediados de los años ochenta se confirmó que, en un espaciotiempo de 10 dimensiones, resulta posible formular hasta cinco teorías de cuerdas diferentes, cada una de ellas con el mismo potencial para describir nuestro mundo. Semejante proliferación era todo menos deseable, ya que la candidata a una teoría unificada debía ser, además, única. Sin embargo, en los años siguientes se avistó una solución al problema: las cinco teorías de cuerdas podían interpretarse como límites matemáticos de una teoría única, a la que dio en llamarse "teoría M". Esta notable circunstancia dio alas a los físicos teóricos. ¿Podría la teoría de cuerdas hacer predicciones unívocas sobre nuestro universo a partir de un conjunto de ecuaciones fundamentales? ¿Sería posible calcular, a partir de ella, las constantes fundamentales de la naturaleza y describir el espectro de partículas elementales que conocemos?

Sin embargo, el resultado fue otro. A día de hoy, sólo estamos capacitados para describir nuestro mundo de 4 dimensiones si 6 de las dimensiones espaciales extra adoptan una configuración compacta (finita) y muy pequeña. En cada punto del espaciotiempo de 4 dimensiones que conocemos, "cuelga" un espacio de 6 dimensiones espaciales compactas y diminutas. Si bien éstas han de ser lo bastante pequeñas como para explicar que no podamos observarlas ni acceder a ellas, su efecto sobre la física en cuatro dimensiones es considerable: en función del tipo de compactación, o "compactificación" (según la geometría que exhiba ese espacio de 6 dimensiones) el universo emergente de 4 dimensiones posee más o menos partículas elementales y se rige por unas interacciones fundamentales u otras.

¿Por qué existe precisamente nuestro universo?

Es en este punto donde la teoría de cuerdas pierde su carácter unívoco. Ello se debe a que, siempre que una teoría física permite más de una solución, hemos de aceptar que cada una de esas soluciones cuenta con una probabilidad de realizarse físicamente o, en su defecto, debemos explicar por qué ése no es

2. LA TEORIA DE CUERDAS se basa en el postulado de que los constituyentes fundamentales de la materia no son partículas, sino "cuerdas": pequeños objetos unidimensionales. Las diferentes partículas elementales que conocemos serían los distintos modos de vibración de esas cuerdas, cuyo tamaño se estima en unos 10^{-35} metros.



KRISTIN RIEBE/*Spektrum der Wissenschaft*

el caso. Contra todas las expectativas, resulta que existe un número exorbitante de espacios compactados que aparecen como soluciones de la teoría de cuerdas. Unas mismas ecuaciones permiten un número enorme de universos posibles, cada uno con diferentes propiedades. Según la teoría de cuerdas, cada uno de ellos describe de manera correcta lo que llamamos un "vacío" de la teoría, un estado fundamental válido. Pero ninguna de esas soluciones destaca sobre el resto; ninguna nos da motivo alguno para preferirla frente a las demás. Carecemos de un principio de selección. No podemos argumentar por qué justo nuestro universo (una solución entre otras muchas) debería ser real y el resto no. ¿Existe, pues, más de un universo?

Vivir en una depresión

El conjunto de todas las soluciones posibles de las ecuaciones de la teoría constituye lo que los físicos han bautizado como "paisaje" [*véase* "El paisaje de la teoría de cuerdas", por R. Bousso y J. Polchinski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2004]. Semejante paisaje teórico resulta, desde luego, un espacio extremadamente abstracto. Su nombre obedece a que, en una escala de energías adecuada, resulta posible imaginar ese espacio como una colección de montañas, colinas, valles y depresiones. Los últimos corresponderían a universos con una energía del vacío muy pequeña, y las cumbres, a universos con una alta energía potencial. Nuestro universo se hallaría en una depresión, es decir, un estado fundamental con una energía del vacío muy baja. De hecho, nuestros cosmólogos ya han medido tal valor [*véase* "Cuestiones fundamentales de cosmología", por P. Schneider; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2010].

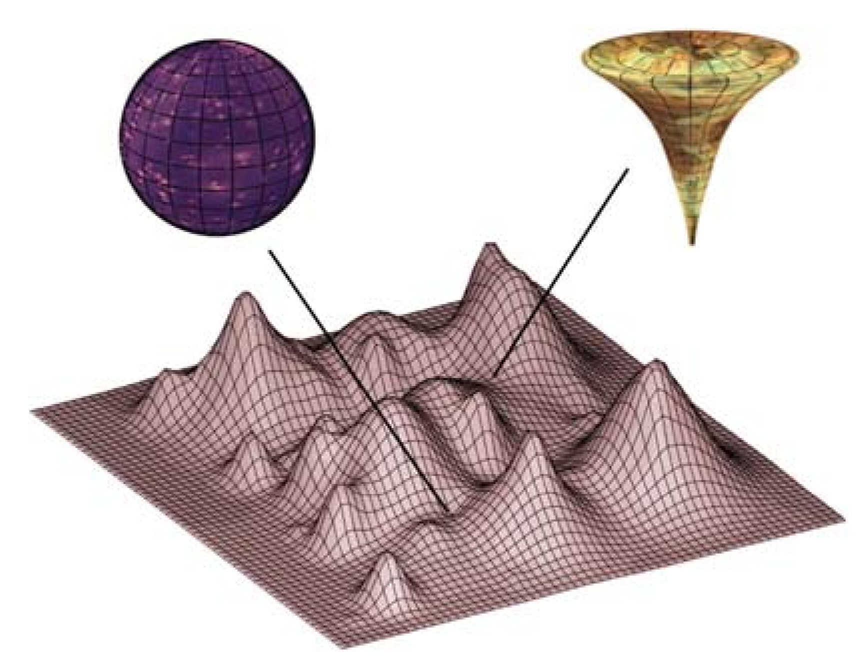
La representación de las soluciones de una teoría mediante cumbres y valles energéticos de diferentes alturas no es nada nuevo. Este método se emplea a menudo en física del estado sólido, donde la descripción de sistemas muy complejos requiere ecuaciones que permiten un gran número de soluciones. De ellas, o bien todas se realizan o, al menos, todas cuentan con una posibilidad de hacerlo. Un buen ejemplo lo constituyen los estados de agregación del agua (sólido, líquido o vapor). Aun así, la teoría de cuerdas va más allá. A diferencia de la física de materiales, que describe los estados de un cuerpo en un mismo universo, la teoría de cuerdas asigna un universo diferente a cada estado fundamental.

La sorpresa fue aún mayor cuando se descubrió que la teoría de cuerdas no sólo permite la existencia de unos pocos valles y colinas, sino la de un número casi inconmensurable de ellos. Algunas estimaciones arrojan resultados de entre 10^{100} y 10^{1000} mundos posibles; números que superan con creces la cantidad de átomos en nuestro universo (del orden de 10^{80}).

Por si fuera poco, el paisaje de la teoría de cuerdas se halla sujeto a un constante cambio. Las ecuaciones que describen su comportamiento permiten la posibilidad de transiciones espontáneas. Los universos pueden, a través de diferentes procesos, ganar energía potencial y elevarse desde un valle hacia una colina. Una vez en una cumbre, su tendencia natural es caer hacia un valle o, lo que es lo mismo, a un estado de menor energía (al igual que en la física clásica, los estados con una baja energía potencial son más probables que aquellos con una energía alta).

Durante una transición entre dos niveles energéticos, el propio universo sufre transformaciones que, bajo determinadas circunstancias, son tan radicales que se podría hablar del nacimiento de un nuevo universo. Es probable que la gran explosión de nuestro universo no fuese más que su transición desde un estado energético superior hacia un valle energético.

Parece que debemos concluir que la búsqueda de una "teoría del todo" que describa un universo único y que haga predicciones sobre todos los experimentos futuros ha sido demasiado ingenua. La misma idea de un multiverso, que implica un gran número de constantes e incluso leyes de la naturaleza, despoja a la física de una gran parte de su capacidad predictiva. Diríase que la teoría de cuerdas predice todo y, como corolario de ello, nada al mismo tiempo.



3. EN EL "PAISAJE" DE LA TEORIA DE CUERDAS los universos con mayor energía del vacío se representan como colinas. Los valles, por el contrario, se corresponderían con universos con una pequeña energía del vacío, como es el caso del nuestro.

KRISTIN RIEBE/*Spektrum der Wissenschaft*

Argumentos filosóficos como el principio antrópico podrían explicar los valores observados de las constantes de la naturaleza

Es más. Dentro del paisaje de la teoría de cuerdas, resulta harto complicado rastrear qué solución representa nuestro propio universo; es decir, cuál describe nuestro espectro de partículas elementales y sus interacciones fundamentales. Y, aunque desde hace poco se han multiplicado las señales que indican que la tarea de encontrar nuestra particular aguja en semejante pajar podría tener éxito, los físicos han de preguntarse si es lícito hablar de "ciencia" cuando una teoría no hace predicciones unívocas, ni contrastables, ni falsables.

Dicha pregunta suscitó hace algunos años un verdadero debate. Los ataques más feroces a la teoría de cuerdas se lanzan contra sus afirmaciones indemostrables acerca de un número indeterminado de universos, así como contra su incapacidad para explicar por qué las constantes y las interacciones de la naturaleza son tal y como las conocemos.

A este respecto, la comunidad científica se ha dividido en tres corrientes de opinión. Una de ellas rechaza por principio la idea del multiverso. Sus partidarios creen en un único universo real que debe quedar descrito por una única teoría. David Gross, premio Nobel y descubridor de dos de las cinco teorías de cuerdas en 10 dimensiones, dijo una vez: "¿La idea del paisaje? ¡La odio! ¡Nunca os rindáis ante ella!".

Otro grupo de físicos acepta que existan varias posibilidades para describir un universo, pero considera dichas reflexiones un mero divertimento matemático. Sus defensores buscan un principio de selección que privilegie a nuestro universo frente a las restantes soluciones de la teoría de cuerdas. Suponen —o al menos esperan— que, algún día, la teoría será capaz de explicar por qué nuestro universo es tal y como lo observamos.



Es posible que la gran explosión no fuera más que la transición del universo de un estado de alta energía hacia un valle energético

Por último, existe un tercer grupo que acepta la idea de una multitud de universos como algo que en realidad existe. Fundamentan su postura en el principio antrópico. Dicho principio fue introducido por Brandon Carter en cosmología para explicar por qué surgió vida inteligente en el universo, si bien tal acontecimiento parece del todo improbable [*véase* "Buscando vida en el multiverso", por A. Jenkins y G. Pérez; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2010]. Afirma que el universo en el que vivimos ha de ser el adecuado para el desarrollo de vida inteligente porque, de otro modo, no existiríamos para observarlo. Una variante de este principio asegura que pueden existir multitud de universos, pero que no deberíamos asombrarnos de vivir justo en el nuestro, ya que es éste el que proporciona las condiciones para la existencia de vida inteligente.

Numerosos físicos rechazan el principio antrópico. Según ellos, no posee capacidad predictiva alguna, ya que de él no puede deducirse ningún valor para magnitudes físicas concretas ni explica ninguna característica de la naturaleza. Opinan que los teóricos de cuerdas no deberían hacer un mal uso del principio antrópico para justificar sus innumerables soluciones. Más bien, deberían intentar obtener una única solución, un único universo que se parezca al nuestro.

La explicación de un milagro aparente

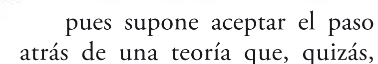
En opinión del autor, el principio antrópico representa algo más que una argucia filosófica o una excusa. De hecho, en el ámbito de la teoría de cuerdas, soluciona dos viejos problemas de la física: por qué las leyes físicas son las que observamos y por qué las constantes de la naturaleza parecen estar ajustadas con tanta exactitud para permitir la existencia de vida tal y como la conocemos. En ambos casos, el principio antrópico se apoya en la ley de los grandes números: en una muestra lo bastante grande tomada al azar, todo evento posible ha debido ocurrir en algún lugar. Así, todas las posibles leyes de la naturaleza han cobrado forma en sus respectivos universos; sin embargo, los observadores sólo existen en un universo favorable a la vida.

En lo que respecta a las constantes de la naturaleza, tal razonamiento resulta especialmente poderoso. En un multiverso, el principio antrópico logra explicar el excepcional ajuste fino del que hace gala nuestro universo; es decir, el aparente "milagro" que permite nuestra existencia, a pesar de que una mínima variación de las constantes de la naturaleza habría impedido la aparición de vida. El gran número de combinaciones posibles en el multiverso también debió haber engendrado nuestra diminuta "ventana de constantes"; así pues, no tendríamos que sorprendernos de estar observándola ahora mismo.

Además, nuestra ventana de constantes se torna estadísticamente necesaria. Ello aumenta el valor científico del razonamiento antrópico, ya que libera a nuestro cosmos de la mácula de ser un fenómeno curioso, ajustado al milímetro por la razón que sea.

A pesar de todo, argumentar con ayuda del principio antrópico resulta insatisfactorio,

KRISTIN RIEBE/*Spektrum der Wissenschaft*



pues supone aceptar el paso atrás de una teoría que, quizás, hubiera podido proporcionar explicaciones y predicciones claras sobre el mundo. Pero esto no tiene por qué ser siempre así, máxime si convenimos en que toda teoría requiere una confirmación, aunque sea parcial. Para escapar del dilema de los múltiples tipos de compactación, desde hace poco los expertos persiguen una nueva estrategia que se ofrece prometedora: se consideran diferentes categorías de compactación a cuatro dimensiones con el fin de averiguar si poseen "buenas" propiedades físicas.

En particular, se estudian qué clases de compactación contienen el modelo estándar o implican la inflación cósmica (la fase de expansión exponencial que, según todos los indicios, sufrió nuestro universo poco después de la gran explosión). En segundo lugar, se investiga si dichas compactaciones poseen propiedades comunes que permitan derivar de ellas nuevas predicciones verificables empíricamente.

Dichas cuestiones parecen estar al alcance de ciertas clases de compactación muy estudiadas en el último decenio, los "modelos de intersección de branas". En dichos modelos, la interacción gravitatoria se describe a partir de los estados de vibración de cuerdas cerradas (aquellas cuyos extremos se hallan unidos), mientras que el resto de las interacciones, como la electromagnética, proceden de los modos de vibración de cuerdas abiertas. Los extremos de las cuerdas abiertas se encuentran "pegados" a branas (planos multidimensionales en el espaciotiempo de diez dimensiones) que se intersecan en el espacio compacto de las seis dimensiones extra.

Los modelos de intersección de branas se muestran muy apropiados para reproducir el modelo estándar de partículas elementales. En particular, permiten asombrosas predicciones sobre los futuros experimentos en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Para poder observar dichas predicciones dentro de la escala de energías a la que operará el LHC, un requisito fundamental es que el espacio compacto sea relativamente grande. Tales escenarios con dimensiones extra de gran tamaño (del orden 10^{-3} milímetros) han sido estudiados por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Georgi Dvali [*véase* "Nuevas dimensiones para otros universos", N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos y G. Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2000]. De ser el caso, al menos esta clase de modelos de cuerdas sí sería falsable y verificable en un experimento. Por otra parte, tales modelos guardan una estrecha relación con la posibilidad de generar agujeros negros microscópicos en el LHC, algo que abre más oportunidades para su contrastación empírica.

Cosmología y teoría de cuerdas

Hemos de reconocer que, a día de hoy, la posibilidad de observar efectos de teoría de cuerdas en el LHC es especulativa, ya que se basa en algunas suposiciones optimistas, como la relativa a la existencia de dimensiones extra de gran tamaño. No existe ninguna razón para que deba ser así. Sin embargo, quizás en el futuro las observaciones cosmológicas también verifiquen aspectos de la teoría, dado que la estructura del espacio compacto podría acarrear consecuencias medibles sobre la radiación del fondo cósmico de microondas. Además, los nuevos descubrimientos sobre la materia y energía oscuras o las ondas gravitacionales prometen más opciones de someter a la teoría de cuerdas a verificaciones experimentales.

A la vista de que algunas afirmaciones de la teoría sí son contrastables, y dado el valor científico del principio antrópico a la hora de explicar el valor de las constantes de la naturaleza, el autor se halla convencido de que la física teórica actual sigue constituyendo una ciencia exacta de la naturaleza. La teoría se hace preguntas físicas, busca su respuesta y no ha perdido de ninguna manera su contacto con el experimento, lo que implica su falsabilidad en un amplio dominio. Además, posee una competidora en la teoría conocida como "gravedad cuántica de bucles" [*véase* "Atomos del espacio y del tiempo", por L. Smolin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2004], frente a la cual debe aún demostrar sus ventajas.

Sin embargo, quien acepte la teoría del multiverso no logrará apartar la idea de que la misma devuelve un papel protagonista al hombre después de que Copérnico y Darwin se lo arrebataran. Pues, según esta teoría, el hombre no es sólo el afortunado retoño de un universo por lo demás casi despoblado, sino que representa, tal vez, un caso excepcional y extremadamente improbable de un observador inteligente en medio de un paisaje de universos. Ello hace del fenómeno de la vida algo aún más preciado de lo que ya es de por sí.

Bibliografía complementaria

INTERSECTING BRANE WORLDS: A PATH TO THE STANDARD MODEL? D. Lüst en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 21, págs. 1399-1424; 20 de abril, 2004.

SALIR DE LA OSCURIDAD. G. Dvali en *Investigación y Ciencia*, págs. 66-73; abril de 2004.

LAS DUDAS DE LA FISICA EN EL SIGLO XXI: ¿ES LA TEORIA DE CUERDAS UN CALLEJON SIN SALIDA? L. Smolin. Editorial Crítica, 2007.

THE LANDSCAPE OF STRING THEORY. D. Lüst en *Fortschritte der Physik*, vol. 56, n.º 7-9, págs. 694-722, agosto de 2008.

THE LHC STRING HUNTER'S COMPANION. D. Lüst et al. en *Nuclear Physics* B808, págs. 139-200, febrero de 2009.

MUCHOS MUNDOS EN UNO: LA BUSQUEDA DE OTROS UNIVERSOS. A. Vilenkin. Alba Editorial, 2009.

Así se reparten los átomos el espacio

Cada átomo de una red cristalina cuenta con su propia "zona de influencia", formada por todos los puntos que se hallan más cercanos a él que a cualquier otro átomo. Tales poliedros llenan el espacio completamente

Norbert Treitz

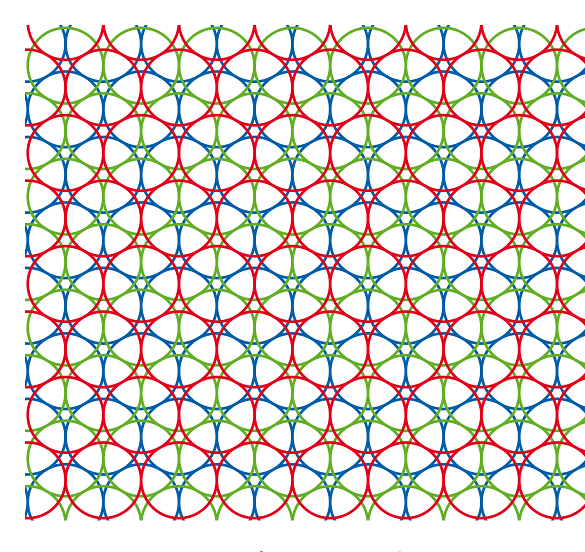
Imaginemos al responsable de un servicio de emergencias municipal. Para conducir a cada paciente al hospital más cercano, habría de señalar en un mapa todos los hospitales de la ciudad y, además, las mediatrices de las líneas que unen cada par de hospitales. El "área de captación" de cada hospital (el conjunto de todos los puntos que se hallen más cerca de ese hospital que de cualquier otro) quedará delimitada por segmentos de dichas mediatrices.

Tales áreas o celdas de influencia también pueden construirse en tres dimensiones. En el caso de un cristal, sus centros coinciden con los átomos de la red. El equivalente a las mediatrices del caso bidimensional lo constituyen ahora los planos de simetría; esto es, los que cortan perpendicularmente y por su centro a las líneas que unen cada par de átomos. Si cada uno de esos planos fuese un espejo, cada átomo vería su imagen reflejada en el lugar en que se halla el átomo vecino. En general, tales particiones del espacio se conocen como celdas de Georgi Voronoi (1868-1908) o de Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet (1805-1859). En el caso de los cristales, se denominan celdas de Wigner-Seitz, en honor a Eugene Wigner (1902-1995) y Frederick Seitz (1911-2008).

Consideremos en primer lugar los cristales formados por un solo tipo de átomos. En tales casos, todas las celdas de Wigner-Seitz son idénticas. Además, han de ser poliedros que, al apilarse, llenen el espacio por completo. Esto se satisface de manera trivial en el caso del cubo. Otras formas que rellenan el espacio se obtienen con facilidad a partir del cubo: un ortoedro (al modificar la longitud de las aristas) o un paralelepípedo. Junto al cubo, los poliedros más simétricos que rellenan el espacio son el octaedro truncado y el dodecaedro rómbico [*véase* "Espumas óptimas", por N. Treitz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2010].

Empaquetamientos óptimos: doce primeros vecinos

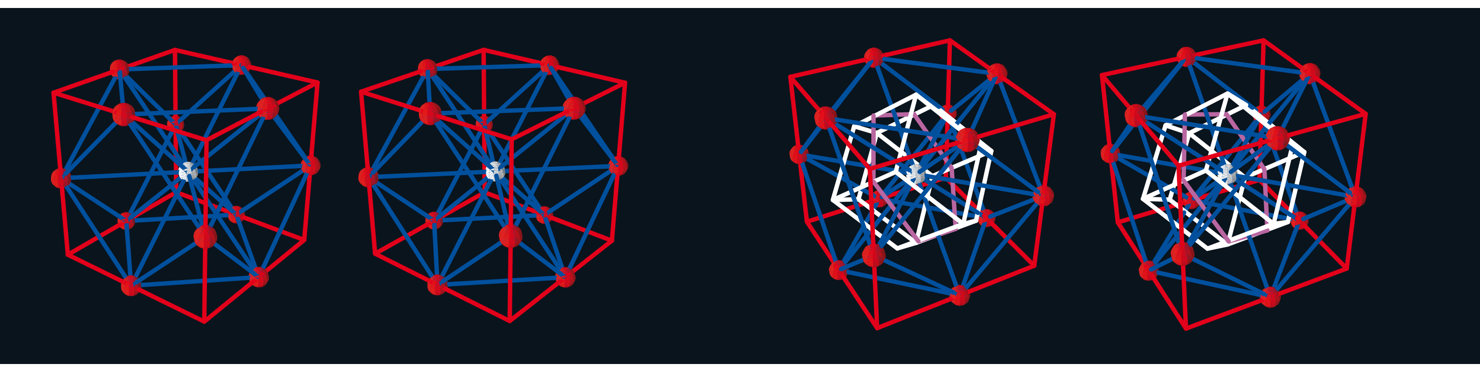
Supongamos que los átomos son esferas de un cierto volumen y que intentamos empaquetarlos en un cristal con la mayor densidad posible. Cuando llenamos una caja con canicas, aparece casi por sí sola una red triangular, como la que por ejemplo muestran los círculos azules representados en la figura 1. Las canicas de la segunda capa ocuparán los intersticios de la capa inferior, si bien para ello existen dos posibilidades (*en la figura 1, en rojo y verde*). Una tercera capa puede adoptar, de nuevo, dos de las tres distribuciones representadas.



1. CAPAS APILADAS en el empaquetamiento compacto de esferas visto "desde arriba". Cada color corresponde a una distribución.

En general, siempre y cuando no se sucedan dos distribuciones idénticas, resulta posible superponer las capas según las variantes azul, roja y verde de manera arbitraria. En todos los casos las esferas llenan algo más del 74 por ciento del volumen total, un valor que Johannes Kepler consideró inmejorable. La demostración de la conjetura de Kepler, presentada por Thomas Hales en 1998, cobró fama por la paciencia que exigió por parte de los expertos que la sometieron a revisión.

Supongamos que las capas se alternan de tal modo que cada una de ellas



2. LOS PRIMEROS VECINOS DE UN ATOMO en una red cúbica centrada en las caras forman un cuboctaedro (*izquierda*). La correspondiente celda de Wigner-Seitz es un dodecaedro rómbico (*derecha*).

siempre tiene dos capas vecinas distintas. En tal caso, cada átomo cuenta con doce "primeros vecinos" (los más próximos a él), seis en su propio plano y tres en cada capa adyacente. Los mismos forman un cuboctaedro, un sólido de Arquímedes con catorce caras: seis cuadrados y ocho triángulos equiláteros (*véase la figura 2, izquierda*). Este poliedro exhibe las mismas simetrías que el cubo; a saber, nueve planos de simetría, tres ejes de simetría de orden cuatro, cuatro ejes de simetría de orden tres y seis de orden dos.

El poliedro puede descomponerse en seis pirámides de base cuadrangular y ocho de base triangular, todas ellas con ápice en el centro del cuerpo y con base en una de sus caras. Dado que el radio de la esfera que circunscribe al cuboctaedro es igual a la longitud de su arista, dichas pirámides resultan ser, respectivamente, "medios octaedros" regulares y tetraedros regulares.

Los vértices del cuboctaedro coinciden con los puntos medios de las aristas del cubo. Si desplazamos dicho cubo media longitud de arista en alguna de las tres direcciones espaciales, veremos que los átomos se hallan en las esquinas y en el centro de las caras, pero no en el centro del cubo. Por ello, esta red se denomina "cúbica centrada en las caras" (FCC, por sus siglas en inglés).

Los doce planos de simetría que cortan perpendicularmente y por la mitad a cada segmento entre dos átomos vecinos delimitan un dodecaedro rómbico: ésta es la celda de Wigner-Seitz para una red FCC (*véase la figura 2, derecha*). Las caras del dodecaedro son doce rombos idénticos con una razón entre sus diagonales igual a $\sqrt{2}$. El poliedro cuenta con dos clases de vértices. Seis de ellos (las "esquinas puntiagudas" de los rombos) coinciden con los vértices de un octaedro y, al mismo tiempo, con los centros de los cuadrados del cuboctaedro. Los otros ocho (las esquinas más obtusas) forman un cubo. Si se descompone el cuboctaedro como se ha descrito arriba (seis medios octaedros y ocho tetraedros regulares), esos ocho vértices coinciden con los centros de los tetraedros.

El otro caso especial de empaquetamiento compacto de esferas viene dado por la alternancia de sólo dos tipos de capas. El número de primeros vecinos de cada átomo sigue siendo doce, pero el poliedro que conforman ya no es un cuboctaedro. La figura resultante puede imaginarse como un cuboctaedro cortado por la mitad, rotado y unido de nuevo. En la clasificación de Norman John- son de todos los poliedros convexos delimitados por polígonos regulares, se trata del cuerpo de número 27 y que lleva por nombre *ortobicúpula triangular* (*véase la figura 3, izquierda*). Como es de esperar, dicho poliedro es menos simétrico que el cuboctaedro.

Resulta llamativo notar que su celda de Wigner-Seitz se halla de modo análogo a como se obtiene la ortobicúpula triangular a partir del cuboctaedro: se corta por la mitad el dodecaedro rómbico (la celda de Wigner-Seitz del empaquetamiento FCC) y se recompone con las dos mitades giradas 60 grados (*véase la figura 3, derecha*).

Ocho primeros y seis segundos vecinos

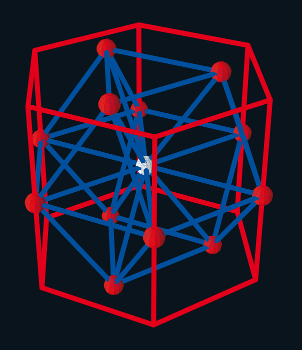
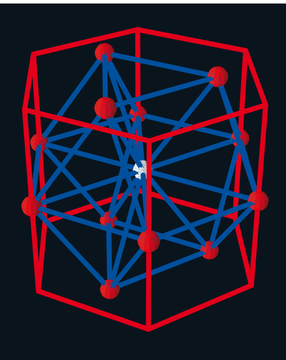
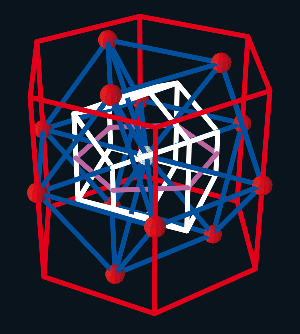
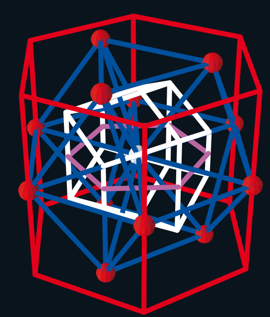
A pesar de ser distribuciones menos simétricas (llenan menos el espacio), no son pocos los cristales en los que los átomos de una red cristalina cuentan sólo con ocho primeros vecinos. A veces, sin embargo, los segundos vecinos más próximos se hallan lo bastante cerca como para tener que tomarlos en consideración a la hora de describir la celda. Este es el caso cuando, en una partición del espacio en celdas cúbicas, todos los vértices y los centros de los cubos se encuentran ocupados por átomos. Este empaquetamiento recibe el nombre de "cúbico centrado en el cuerpo" (BCC).

Podemos considerar que cada celda contiene dos átomos: uno entero en el centro y ocho octavos en los vértices. En esta disposición, un modelo de esferas de igual tamaño que se tocan en un punto llenan el espacio en un $\pi\sqrt{3}/8 \approx 68$ por ciento.

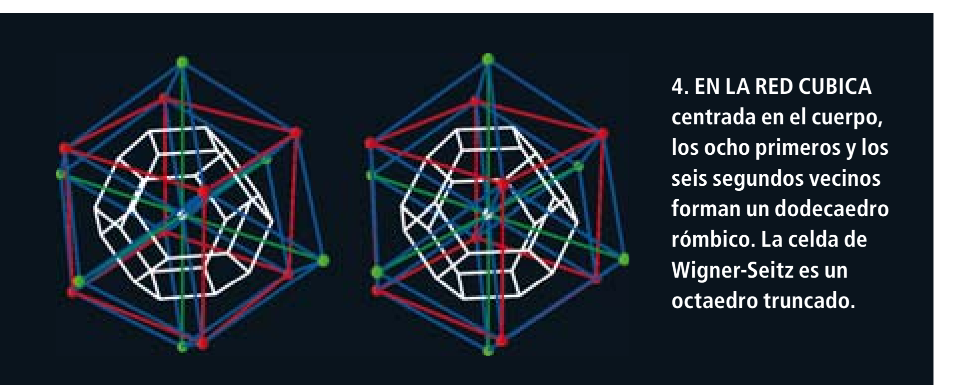
La celda de Wigner-Seitz correspondiente la forman los planos de simetría

IMAGENES ESTEREOGRAFICAS

El lector ha de bizquear al contemplar las dos figuras hasta observar que la imagen se triplica: la figura central es entonces estereográfica. Otro método consiste en mirar con los ojos casi paralelos (hacia el infinito) a través de ambas figuras. Para conseguir la posición correcta, puede emplearse el siguiente método: formando un anillo con los dedos índice y pulgar, mírese a través del agujero de tal forma que, al guiñar los ojos alternadamente, el ojo derecho vea sólo la imagen izquierda y el ojo izquierdo sólo la derecha. Son necesarias algo de paciencia y práctica hasta conseguir una disposición adecuada de los ejes de visión, pero merece la pena.

3. EN EL EMPAQUETAMIENTO COMPACTO hexagonal de esferas, los primeros vecinos de un átomo forman una ortobicúpula triangular (*izquierda*). La celda de Wigner (*derecha*) queda delimitada por seis rombos y seis trapecios, cada uno de ellos compuesto por dos medios rombos. El hexágono regular violeta es el "plano de corte": una rotación del poliedro en este plano devuelve el dodecaedro rómbico de la figura 2.



4. EN LA RED CUBICA centrada en el cuerpo, los ocho primeros y los seis segundos vecinos forman un dodecaedro rómbico. La celda de Wigner-Seitz es un octaedro truncado.

entre un átomo y sus primeros vecinos. Ello resulta en un octaedro que, debido a la simetría cúbica, es regular. El octaedro sobresale del cubo y sus puntas llegan hasta los segundos vecinos. Los planos de simetría entre éstos y el átomo central coinciden con las paredes de la celda cúbica, las cuales "extirpan" del octaedro inicial seis pirámides y lo convierten en un octaedro truncado regular, delimitado por seis cuadrados y ocho hexágonos regulares (*véase la figura 4*).

Seis primeros vecinos: casi inexistentes

La red más simple de todas es la "cúbica simple": cada átomo ocupa una celda cúbica y éstas se apilan de modo uniforme. Una modelización de esta red con esferas que se tocan en un punto ocupa tan sólo un $\pi/6 \approx 52$ por ciento del espacio.

Dicha disposición se muestra tan poco elegante que sólo la exhibe el polonio. Sin embargo, existen cristales que pueden considerarse cúbicos simples si se toman como iguales los dos tipos de iones de los que están compuestos. Esto sucede en todas las sales de un metal alcalino (como el sodio) y un halógeno (como el cloro). Así, en la sal de cocina, los puntos de una red cúbica simple se hallan ocupados, de manera alternada, por iones de sodio y cloro. En esta red, cada átomo (o ion) tiene seis primeros vecinos en los vértices de un octaedro regular, doce segundos en los de un cuboctaedro y ocho terceros en los de un cubo.

Compuestos de carbono: sólo cuatro enlaces, pero estables

En algunos elementos tetravalentes (carbono, silicio y germanio), los átomos forman enlaces covalentes con sólo cuatro vecinos. Estos se acomodan en los vértices de un tetraedro regular (o, en una descripción equivalente, en cada segundo vértice de un cubo), con el átomo en su centro. Así, el ángulo bajo el cual cada átomo ve a dos de sus primeros vecinos es el ángulo tetraédrico: arccos(–1/3) ≈ 109,47 grados. Este aparece sobre todo en la química del carbono y en cadenas que no presentan enlaces múltiples.

En el benceno (C_6H_6), debido a que sus enlaces se hallan deslocalizados, el ángulo entre los mismos no viene dado por el ángulo tetraédrico. La molécula adopta la forma de un hexágono regular. En el ciclohexano (C_6H_{12}), en cambio, los enlaces son simples y el ángulo que subtienden dos primeros vecinos es tetraédrico. Ello no permite cerrar un hexágono contenido en un plano, por lo que el anillo ha de "doblarse" y formar una estructura tridimensional. Esto puede ocurrir de dos maneras que se denominan, según su geometría, "silla" (más simétrica) y "bote".

Por otro lado, en el diamante todos los anillos hexagonales adoptan la conformación de silla. Mientras que los primeros vecinos de un átomo siempre conforman un tetraedro regular, para los segundos vecinos se dan las mismas posibilidades que para los primeros vecinos en el empaquetamiento compacto de esferas: una red FCC con el cuboctaedro como poliedro (*véase la figura 5*), o una hexagonal con una ortobicúpula triangular. Desde 1967, se sabe que el diamante puede exhibir una forma hexagonal diferente, la londsdaleíta, así bautizada en honor de Kathleen Londsdale (1903-1971).

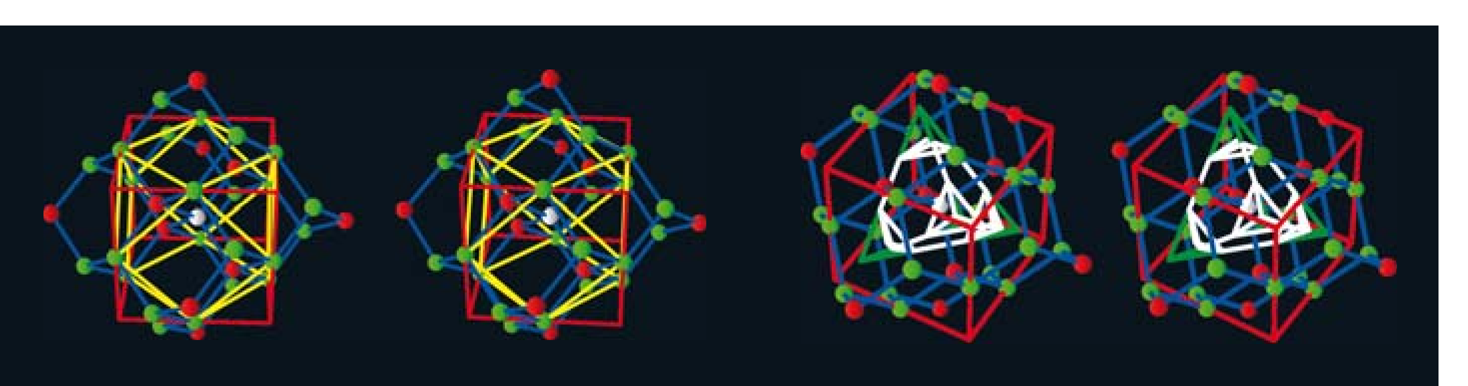
Existen otros compuestos (sobre todo semiconductores) formados por dos elementos diferentes que también exhiben una estructura con cuatro primeros vecinos en los vértices de un tetraedro regular. A estos pertenecen gran cantidad de uniones entre los grupos III-V y II-VI de la tabla periódica u otros como el sulfuro de cinc (ZnS). Su forma cúbica se denomina blenda o esfalerita. Desde 1861, también se conoce una forma hexagonal (wurtzita).

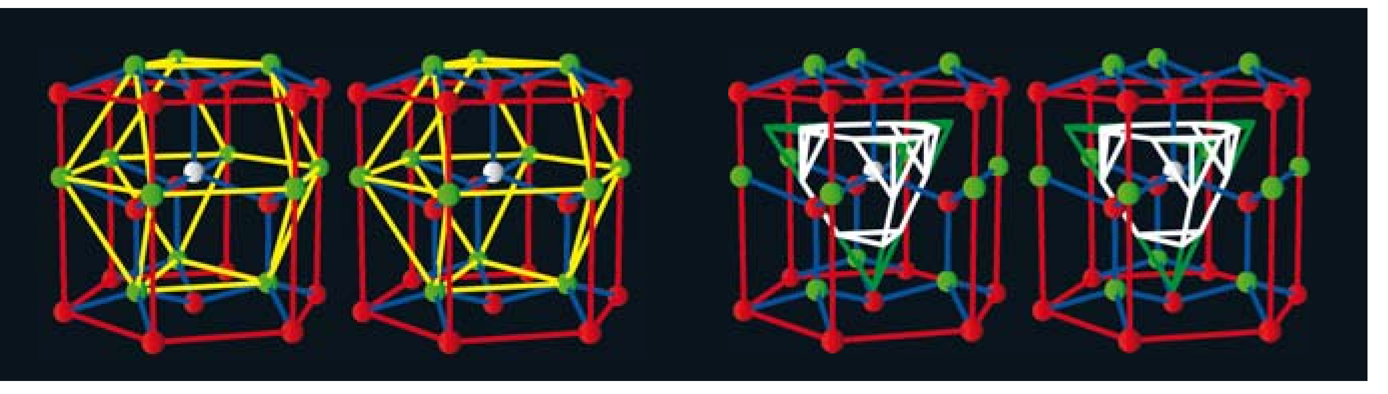
Cuando un cristal con esta estructura cuenta con dos tipos de átomos, los primeros vecinos de un átomo son siempre del otro elemento, los segundos vecinos son de nuevo del primero, y así sucesivamente. Esto es válido para ambas formas, la cúbica y la hexagonal.

Modelos de esferas y de llenado del espacio

En la red cúbica que exhibe el diamante, cada celda cúbica de traslación (*cubo rojo de la figura 5*) contiene cinco átomos enteros y doce "cuartas partes". Si modelizamos de nuevo los átomos como esferas que se tocan en un punto, obtendremos que la configuración llena el es-

5. EN LA RED DEL DIAMANTE (*izquierda*) los primeros vecinos (*rojo*) de un átomo de carbono (*blanco*) coinciden con los vértices de un tetraedro. Los segundos vecinos (*verde*) se hallan en el punto medio de las aristas de un cubo y conforman un cuboctaedro (*amarillo*). A la derecha, la celda de Wigner-Seitz (*blanco*).



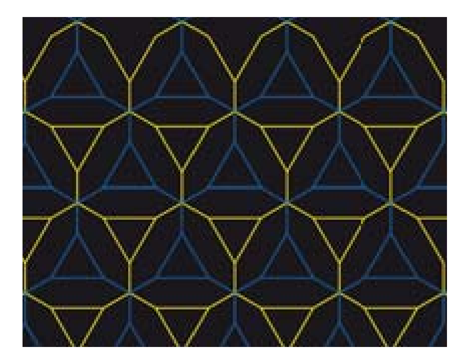


6. EL EQUIVALENTE MENOS SIMETRICO de la red del diamante (*izquierda*): londsdaleíta (con átomos de carbono) o wurtzita (un sulfuro de zinc). En amarillo, la ortobicúpula triangular que conforman los segundos vecinos. A la derecha, la correspondiente celda de Wigner-Seitz (*blanco*).

pacio en un $\pi\sqrt{3}/16 \approx 34$ por ciento. Esto es justo la mitad que en el empaquetamiento BCC. Parece sorprendente que, aunque una red BCC llene el espacio de manera mucho más eficiente, los minerales de mayor dureza mecánica, como el diamante, exhiban una estructura cristalina con mucho más espacio libre entre sus átomos.

El resultado se debe a la modelización de átomos mediante esferas rígidas. En los llamados "modelos de llenado del espacio" que vemos con frecuencia en química orgánica, los átomos de carbono con cuatro enlaces simples no se representan como esferas, sino como tetraedros truncados y ligeramente redondeados. En estos casos, semejante idealización de la geometría atómica se muestra mucho más realista, ya que los átomos unidos mediante enlaces covalentes se "traspasan" unos a otros. De hecho, si empleamos un modelo de llenado del espacio para reconstruir una red de diamante, veremos que ya no queda tanto espacio libre entre los átomos. (Por su parte, los modelos de esferas que se tocan en un punto reproducen bien la estructura de los cristales iónicos y, en las redes metálicas, los átomos guardan algo más de distancia entre sí.)

7. DOS PLANOS DE SIMETRIA en la londsdaleíta o la wurtzita con aristas de la celda de Wigner-Seitz (*figura 6, derecha, "desde abajo"*): vista perpendicular a los nonágonos (*amarillo*), a los triángulos equiláteros (*azul*) y oblicua a los hexágonos. Los triángulos rectángulos no pueden apreciarse desde esta perspectiva.



En los modelos de llenado del espacio, se entiende que el espacio que ocupa un átomo de carbono viene dado por su celda de Wigner-Seitz. Es más, los átomos no sólo ocupan completamente su propia celda de Wigner-Steitz, sino que invaden en parte la celda de sus vecinos.

¿Qué aspecto tienen dichas celdas? Los cuatro planos de simetría respecto de sus primeros vecinos forman un tetraedro regular. Pero, como es bien sabido, tal figura no rellena completamente el espacio, por lo que esta no puede ser la celda de Wigner-Steitz. De hecho, las puntas del tetraedro ocupan zonas asociadas a las respectivas de los segundos vecinos (de manera análoga a lo que ocurría con el octaedro y su versión truncada en el red BCC, si bien la figura resultante es algo más complicada). Así, en el tetraedro que correspondería a cada átomo si sólo atendiésemos a sus primeros vecinos, sus segundos vecinos arrebatan las regiones de las esquinas. Esas regiones adoptan la forma de pequeños tetraedros cuya arista es un tercio de la del tetraedro principal. Si "recortamos" dichas puntas, obtendremos un tetraedro truncado de Arquímedes: de cada arista del tetraedro original sobrevive el tercio central. Puede pensarse en este sólido truncado como en un dominio exclusivo del átomo central.

Pero aún quedan los huecos en forma de pequeños tetraedros que hemos sustraído en cada esquina. Cada uno de ellos pertenece a la celda original de cuatro átomos diferentes. El centro de cada uno de esos huecos tetraédricos equidista de los cuatro átomos, por lo que no puede ser sino un vértice de una celda de Wigner-Steitz. Por ello, lo que hemos de hacer es dividir cada uno de estos huecos desde su centro en otros cuatro tetraedros más, y añadir dichas secciones al tetraedro truncado sobre el que se apoyaba cada porción. Este proceso nos da la forma correcta final de la celda de Wigner-Seitz del diamante: un poliedro delimitado por cuatro hexágonos regulares y doce pequeños triángulos isósceles (*véase la figura 5, derecha*). Podemos pensar en dicha celda como en la "forma" que toma cada átomo de carbono en un cristal de diamante.

En el empaquetamiento hexagonal (londsdaleíta o wurtzita), los anillos hexagonales de las capas que se disponen perpendicularmente a los ejes de simetría de orden tres adoptan la configuración de silla; los demás toman la forma de bote (*véase la figura 6, izquierda*). Dado que también aquí existen cuatro primeros vecinos, la celda de Wigner-Seitz no puede ser muy distinta a la del diamante. Esta vez, sin embargo, los pequeños tetraedros de las esquinas no se los disputan cuatro átomos, sino tres (*véase la figura 6, derecha*). El cuarto lado pertenece, de hecho, a un plano de simetría. Este plano contiene la cara correspondiente del tetraedro truncado: un hexágono al que la adición de tres pequeños triángulos isósceles convierte en un nonágono con una simetría de orden tres. La celda de Wigner-Seitz queda delimitada, por tanto, por dicho nonágono, tres hexágonos regulares, seis pequeños triángulos rectángulos y uno equilátero (*véase la figura 7*).

Releyendo a Borges

Cómo caracterizar el orden alfabético de las palabras de una biblioteca total

Gabriel Uzquiano

En la columna de este mes quisiera discutir dos problemas inspirados por relatos de Jorge Luis Borges. Ambos consisten en la caracterización de ciertas relaciones de orden entre los elementos en un conjunto.

En uno de sus relatos, *El libro de arena*, Borges imagina un libro sagrado con las siguientes características:

> *En el ángulo superior de las páginas había cifras arábigas. Me llamó la atención que la página par llevara el número (digamos) 40.514 y la impar, la siguiente, 999. [...] Me pidió que buscara la primera hoja. Apoyé la mano izquierda sobre la portada y abrí con el dedo pulgar casi pegado al índice. Todo fue inútil: siempre se interponían varias hojas entre la portada y la mano. Era como si brotaran del libro. [...] Comprobé que las pequeñas ilustraciones distaban dos mil páginas una de otra.*

No cabe duda de que no se trata de un libro ordinario. En éstos, el orden de sus páginas es como el orden de los miembros de un segmento inicial de los números naturales. Existen una primera y última página; cada página, excepto la primera, posee un predecesor inmediato, y cada página, excepto la última, posee un sucesor inmediato.

¿Qué podemos decir acerca de la relación de orden entre las páginas del *Libro de Arena*? Se trata, en primer lugar, de un *orden estricto:* la relación de orden es asimétrica (si p precede a q, q no precede a p) y transitiva (si p precede a q y q precede a r, entonces p precede a r). El orden es, además, *total:* dos elementos p y q cualesquiera son comparables entre sí (p precede a q o q precede a p).

Dado que las páginas se encuentran numeradas, sabemos que existe una correspondencia biunívoca entre sus páginas y algún subconjunto infinito de los números naturales. Pero, como carece de primera página, su orden no puede ser como el de los números naturales ordenador de menor a mayor. Por otra parte, parece que toda página posee un sucesor y un predecesor inmediato, ya que, de otra manera, no sería posible contar dos mil páginas entre ilustración e ilustración. El único conjunto dotado de orden como el que acabamos de describir es el de los números enteros ordenados de menor a mayor: $\{..., -3, -2, -1, 0, 1, 2, ...\}$.

Curiosamente, Borges concluye otro de sus relatos, *La Biblioteca de Babel*, con una nota a pie de página en la que describe un volumen parecido, si bien con una diferencia fundamental:

> *[Un volumen] que constara de un número infinito de hojas infinitamente delgadas. [...] El manejo de ese* vademécum *sedoso no sería cómodo: cada hoja se desdoblaría en otras análogas.*

Parece que, dadas dos páginas cualesquiera, siempre hallaremos una página intermedia. Un teorema de Cantor demuestra que cualquier orden estricto como el que exhiben las páginas del volumen imaginado por Borges es del mismo tipo que el de los números racionales ordenados de menor a mayor. Para ser más preciso:

(i) El conjunto posee el mismo tamaño que los números naturales (el cual puede demostrarse que es igual al de los números racionales).

(ii) Su orden debe carecer de primer y último elemento.

(iii) Ha de ser *denso:* dados dos elementos cualesquiera, siempre es posible intercalar entre ambos otro elemento del conjunto.

La Biblioteca de Babel

El relato describe una gran biblioteca en la que se encuentra todo libro imaginable que conste de cuatrocientas diez páginas de cuarenta renglones con ochenta ocurrencias de veinticinco símbolos fundamentales: veintidós letras, el espacio, el punto y la coma.

Así, entre sus volúmenes se encuentran palabras como "dhcmrlchtdj", que, sin duda, carecen de sentido para muchos de nosotros. Sin embargo, todas ellas podrían encerrar un terrible sentido en algún idioma desconocido. La biblioteca abarca todo lo que es expresable en cualquier idioma con un cierto número de caracteres, desde copias de *Don Quijote* hasta la historia más minuciosa del mundo.

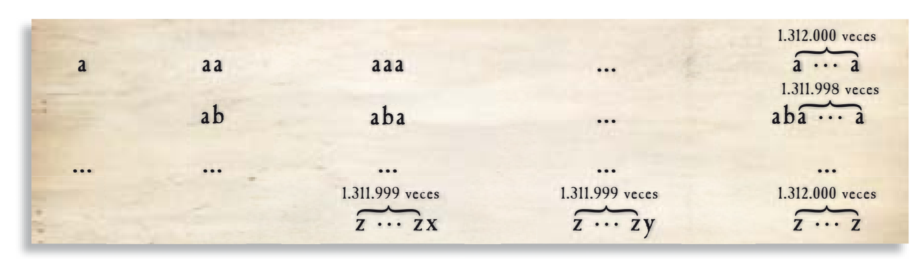
Como cada libro incluye cuatrocientas diez páginas de cuarenta renglones con ochenta símbolos cada uno, cada volumen contiene 1.312.000 símbolos. Se sigue que existen

$$N = 22 + 22^2 + 22^3 + \cdots + 22^{1.312.000}$$

palabras posibles y $25^{1.312.000}$ libros diferentes en la biblioteca. Se trata sin duda de cifras exorbitantes (de acuerdo con algunas estimaciones, el número de átomos en el universo es del orden de 10^{80}), pero finitas.

Un catálogo que recogiese todas las palabras que aparecen en algún volumen de la Biblioteca de Babel debería contener N entradas. Si insistiéramos en una página por palabra, obtendríamos un volumen de N páginas que podríamos ordenar alfabéticamente (*véase la figura*).

Sin embargo, tal catálogo sería un libro ordinario en lo que concierne a la relación de orden entre sus páginas. Existen una primera y una última página. Cada página, excepto la última, posee un sucesor inmediato en la relación de orden: por ejemplo, a continuación de la página dedicada a la palabra "dhcmrlchtdj" vendría la página dedicada a la palabra "dhcmrlchtdj**a**". Del mismo modo, cada página, excepto la primera, posee



EL ORDEN ALFABETICO de las palabras de la Biblioteca de Babel.

un predecesor inmediato: antes de la página dedicada a "dhcmrlchtdj" vendría la página dedicada a la palabra

$$\text{dhcmrlchtd}\overbrace{\mathbf{iz}\cdots\mathbf{z}}^{1.311.989\text{ veces}}.$$

Orden alfabético

El teorema de Cantor enunciado más arriba puede ayudarnos a resolver otro problema inspirado por *La Biblioteca de Babel:* ¿qué ocurriría si prescindiésemos del límite de 1.312.000 caracteres? Al fin y al cabo, una biblioteca universal debería abarcar volúmenes con cualquier número de páginas. Consideremos pues lo que ocurriría si elaboráramos un catálogo exhaustivo de todas las palabras posibles con cualquier número de letras.

A diferencia del anterior, ahora habríamos de incluir un número infinito de entradas: una para cada palabra correspondiente a una variación aleatoria de un número finito de caracteres obtenidos a partir de un alfabeto inicial de veintidós letras. Además, ese catálogo no sería un libro ordinario en lo que respecta al orden de sus páginas. Aunque nuestro catálogo universal comenzaría igual que el anterior:

a, aa, aaa, ...,

ahora no habrá una última palabra de la forma "a ⋯ a". ¿Qué ocurre tras la serie infinita de palabras de la forma "a ⋯ a"? ¿Habrá una primera página que siga a esa serie infinita con la que comienza el catálogo? ¿Habrá una última página? Necesitamos dos observaciones a fin de responder a nuestras preguntas.

(1) Toda palabra es o bien una serie finita de ocurrencias de "a", o bien el resultado de añadir cero o más ocurrencias de la letra "a" a una palabra cuya última letra no es una "a". Entre estas últimas se incluirán palabras como

dhcmrlchtdj, dhcmrlchtdj**a**, dhcmrlchtdj**aa**, dhcmrlchtdj**aaa**, ...

(2) La relación de precedencia en el orden alfabético entre todas las palabras cuya última letra no es una "a" exhibe el mismo orden que los números racionales ordenados de menor a mayor.

Para convencernos de que la última observación es cierta, hemos de verificar que se satisfacen los requisitos del teorema de Cantor:

(i) Hay exactamente tantas palabras en el conjunto como números naturales. Veamos en primer lugar que hay tantas palabras en la biblioteca como números naturales. Si asignamos un número natural a cada letra del alfabeto ("a" = 1, "b" = 2, ...), podemos codificar cada palabra mediante un número natural de la siguiente manera: si la palabra consta de n caracteres, elevamos los primeros n números primos al número que corresponde a cada letra y formamos el producto. Por ejemplo:

$$\text{acab} = 2^1 \cdot 3^3 \cdot 5^1 \cdot 7^2.$$

Como todo número natural mayor que 1 posee una única factorización en números primos, a cada uno de ellos corresponde una única palabra (y viceversa). Por último, otro teorema demuestra que cualquier subconjunto infinito de los números naturales (como los pares o los primos) posee el mismo tamaño que los naturales. Tenemos, pues, que hay tantas palabras cuya última letra no es una "a" como números naturales.

(ii) El orden alfabético entre palabras cuya última letra no sea una "a" carece de primer y de último elemento. Dada una palabra cualquiera, para obtener un predecesor (no inmediato) basta con añadir el prefijo "a". Por ejemplo: "**a**dhcmrlchtdj". Para obtener un sucesor (no inmediato) basta con añadir el sufijo "b". Por ejemplo: "dhcmrlchtdj**b**".

(iii) El conjunto de palabras cuya última letra no es una "a" es denso: entre dos palabras cualesquiera siempre podemos intercalar otra palabra intermedia cuya última letra no es una "a". Existen dos posibilidades:

- Una de ellas es un segmento inicial de la otra. Por ejemplo:

dhcmrlchtdj, dhcmrlchtdjb.

Basta entonces con intercalar una "a" en el lugar adecuado:

dhcmrlchtdj, dhcmrlchtdj**a**b, dhcmrlchtdjb.

- Ambas palabras comparten un segmento inicial (tal vez vacío). Por ejemplo:

dcmarlctdj, **dcm**brlctdjb.

Basta entonces con añadir una "b" (por ejemplo) en el lugar adecuado:

dcmarlctdj, dcmarlctdj**b**, dcmbrlctdjb.

Por tanto, el teorema de Cantor nos dice que la relación de precedencia en el orden alfabético entre las palabras cuya última letra no es una "a" coincide con la de los números racionales ordenados de menor a mayor.



Finalmente, al combinar (1) y (2) podemos caracterizar la relación de precedencia entre las páginas de nuestro catálogo universal como sigue:

- Aparecen en primer lugar páginas dedicadas a palabras cuya única letra es la "a":

a, aa, aaa, aaaa, ...

- Aparecen a continuación series infinitas de páginas dedicadas a palabras como

dm, dm**a**, dm**aa**, dm**aaa**, ...
fge, fge**a**, fge**aa**, fge**aaa**, ... ,

donde las series infinitas aparecen ordenadas de acuerdo con la posición de la raíz según el orden alfabético entre las palabras cuya última letra no es una "a".

El orden de cada serie de palabras cuya única letra es una "a", así como el de las que resultan de añadir una o más ocurrencias de "a" a una palabra cuya última letra no es una "a", es igual al de los números naturales. Por otra parte, en virtud de (2), tenemos que el orden alfabético entre palabras que no acaban por "a" es del mismo tipo que el de los números racionales.

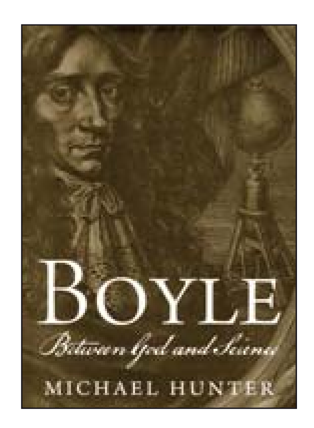
Por tanto, tras la primera serie de palabras cuya única letra es la "a", vamos a encontrar tantas series de palabras que resultan de añadir una o más ocurrencias de la letra "a" a una palabra cuya última letra no es una "a" como racionales. Además, esas series exhiben el mismo orden que los racionales ordenados de menor a mayor.

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.

¿Quiere saber más?

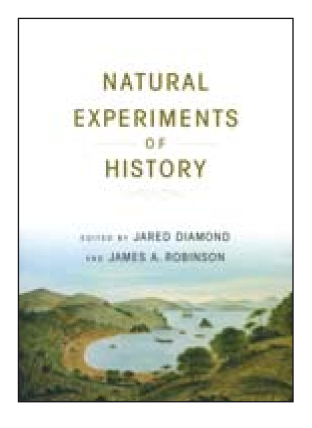
La caracterización del orden alfabético se debe a George Boolos, quien solía asignar el problema como ejercicio en sus cursos de teoría de conjuntos.

El libro de arena aparece en la colección homónima de relatos de Jorge Luis Borges. *La Biblioteca de Babel* aparece en *Ficciones*.



BOYLE. BETWEEN GOD AND SCIENCE,

por Michael Hunter. Yale University Press, 2009.



NATURAL EXPERIMENTS OF HISTORY.

Dirigido por Jared Diamond y James A. Robinson. The Belknap Press of Harvard University Press. Cambridge, Mass. 2010.

El experimento

En ciencia y en humanidades

Meses atrás, recordábamos la figura de Robert Hooke a propósito del experimento en la ciencia. Hooke encontró en Robert Boyle (1627-1691) mentor y mecenas. Boyle pertenece al panteón de la ciencia, junto con Newton y Einstein. Pensador sutil y penetrante, confió en el método experimental para armar una novedosa visión mecanicista de la naturaleza. Su laboratorio de Londres, desde 1668, se convirtió en centro de investigación, al que acudió, entre otros, Leibniz (*Boyle. Between God and Science*).

Su trabajo pionero, *New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effects* (1660), recogía una serie de experimentos con la bomba de aire, que demostraba que los fenómenos observados por Torricelli eran causados por el aire, que el sonido resultaba imposible en el vacío, que el aire se hacía necesario para la vida y la llama y destacaba el carácter elástico del aire. En un apéndice a la segunda edición (1662), desarrolló este último descubrimiento en una relación cuantitativa: el volumen variaba inversamente con la presión, o ley de Boyle. De sus múltiples experimentos *in vacuo* se reseñan los que mostraban que frutos y verduras contenían aire (dióxido de carbono), que ellos desprenden, durante la fermentación, el "aire fijo" de los químicos de la Ilustración.

Abominaba de las formas y cualidades aristotélicas; les buscó explicaciones mecanicistas, en términos de materia y movimiento. Se apoyó en un método experimental riguroso para poner de manifiesto la realidad de unas partículas cuyo tamaño, figura y movimiento dieran cuenta de los fenómenos. Halló en el corpuscularismo el modelo doctrinal idóneo. Por encima de todo, concedió al experimento, en su *Certain Physiological Essays* (1661), un papel destacado en la prueba, que a la postre, terminaría aceptado y promovería el desarrollo de la química y la física posteriores.

La química fue su medio natural, desde *Certain Physiological Essays*, donde aparece su trabajo experimental sobre la constitución corpuscular de la materia, partiendo del caso del salitre, que hemos de leer con *Sceptical Chymist* (1661). Descubrió nuevas combinaciones y reacciones químicas. Identificó el hidrógeno y suyo fue el desciframiento de la química del ácido fosfórico y la descripción de sus propiedades físicas, en 1680 y 1682. A él le debemos la identificación empírica de sustancias a través de los cambios de color operados en el desarrollo de las reacciones. En *Experiments and Considerations Touching Colours* (1664) se arrogaba la primacía de la observación de que todos los ácidos tornaban rojo el jarabe azul de violetas; los álcalis lo tornaban verde.

Recurrió a las *Philosophical Transactions* para publicar notas breves, como las famosas sobre "Light and Air" y sobre la respiración, editadas entre 1668 y 1670. Durante largos años se ocupó de la teoría mecánica de la luz. En 1670 inició una serie de libros misceláneos con el título común de *Tracts*, que recogían trabajos dispares y hallazgos experimentales que iba acumulando. Se sintió fascinado por el espécimen de fósforo que Johann Daniel Krafft había producido en su presencia y, tras escribir una exposición inicial, que apareció en las *Philosophical Collections* (1677) de Hooke, se aprestó a examinar el fenómeno con detenimiento. Además de los objetos luminiscentes, mereció su atención el papel de la putrefacción o fermentación en el establecimiento de partículas en rápido movimiento. Boyle influyó en el joven Newton. Asiduo lector de los escritos de Boyle, Newton halló en los *Experiments and Considerations Touching Colours* inspiración para sus primeros experimentos ópticos.

Por encima de todo, Boyle fue filósofo experimental, que dio consistencia al programa de Francis Bacon, en el umbral del siglo XVII. Las palabras de Lord de Verulam se sumaron a las tradiciones alquímicas y químicas (procedimientos elaborados de disolución, filtración y destilación), depuradas por Boyle. Este se mostró extraordinariamente ingenioso a la hora de diseñar experimentos que aportarían información significativa sobre los fenómenos que le interesaban. Sin restar esfuerzos a la búsqueda y creación de instrumentos que le permitirían manipular la naturaleza y extraer conclusiones. Pensemos en la bomba de aire o cámara de vacío, constituida en emblema de su labor inquisidora; su habilidad se extendió a termómetros, barómetros, balanzas e higroscopios.

Para él, la recogida de datos empíricos constituía un aspecto valioso en sí mismo de la labor científica. La observación primaba sobre los apriorismos teóricos. Sus ensayos empíricos tenían por fin someter a prueba teorías rivales sobre cómo operaba el mundo real y, en particular, vindicar la tesis de que era una gran máquina constituida de materia en movimiento. La asunción de esa filosofía mecanicista constituyó un componente clave de la Revolución Científica. En diversos escritos, de manera particular, en *The Origin of Forms and Qualities* (1666-7) y en *Of the Excellency and Grounds of the Mechanical Hipótesis* (1674), Boyle aportó el cañamazo de la

filosofía mecanicista, una doctrina avanzada con anterioridad por Pierre Gassendi y René Descartes.

Sueñan las humanidades con entrar en la senda rigurosa de la ciencia empírica. Se despiertan ante el muro del método experimental. En el experimento controlado y replicado en el laboratorio, el científico manipula las variables. Sociólogos y filósofos se las han de ver con conceptos borrosos, en tanto que la física o la biología se proponen explicar objetos acotados y definidos, sujetos a medición cuantitativa (velocidad, masa, tasa de reacción química o luminosidad). ¿Qué parámetros aplicar a la felicidad, la motivación, el éxito o la estabilidad personal?

Cierto es que la manipulación experimental resulta también imposible en las ciencias relacionadas con el pasado, como son la paleontología, epidemiología, geología histórica y astronomía. Y en otras ocasiones, tal intervención se reputa inmoral; en particular cuando se trata de la experimentación animal indiscriminada o de una alteración ambiental profunda (fusión de glaciares).

Mas a lo largo de la historia se dan experimentos naturales, no provocados por el experimentador. En ellos se basa el método comparado. Este consiste en cotejar —de preferencia cuantitativamente y con el auxilio de análisis estadísticos— diferentes sistemas semejantes. Sabemos qué grupos sanguíneos humanos oponen resistencia a la viruela, no porque hayamos inoculado el virus de la viruela o la solución control exenta de virus a diferentes grupos sanguíneos, sino como resultado del estudio de los grupos sanguíneos portadores del virus durante una de las últimas epidemias de viruela en la India. Los médicos que asistieron en el brote observaron que unos grupos sanguíneos caían enfermos y otros no.

Los experimentos naturales encierran numerosas limitaciones; no menor, la del riesgo de que el resultado dependa de otros factores que el "experimentador" no había pensado medir, así como la posibilidad de que los genuinos factores explicativos guarden una mera correlación con los factores medidos. Suele citarse la relación entre cáncer y tabaquismo. Hay fumadores que no sufren cáncer y hay no fumadores que lo padecen. Además del tabaco, existen numerosos factores cancerígenos, oncogenes incluidos. Ningún epidemiólogo se atrevería a señalar *la* causa del cáncer ciñéndose a la historia de un solo paciente, pero sí nos es dado identificar numerosas causas de cáncer mediante la comparación y el análisis estadístico.

Cabría esperar que las comparaciones, métodos cuantitativos y estadísticas desempeñaran un papel central en el estudio de la historia. No ocurre tal. En los textos leemos frecuentes afirmaciones del tenor siguiente: "Eso cambió (aumentó o decreció) con el tiempo". "Fue mucho más que eso"; "Fulano hizo más (o menos) que Zutano", o "su comportamiento fue muy distinto del de Perengano". Proferir tales declaraciones sin aportar cifras ni la estadística asociada es enmarcar la comparación sin llevarla a cabo.

Importa distinguir entre experimentos naturales que implican diferencias en las perturbaciones de los que comportan diferencias en las condiciones iniciales. Patrick Kirch se pregunta por qué la historia corrió un curso tan desigual entre las docenas de islas del Pacífico, colonizadas por un mismo pueblo ancestral, los protopolinesios: la islita de Mangaia desarrolló una suerte de jefatura a pequeña escala; el archipiélago de las Marquesas, de tamaño medio, prestó apoyo a múltiples señoríos y guerreros, mientras que las Hawai promovieron políticas de macroescala caracterizadas por "estados arcaicos" emergentes, cada uno de los cuales abarcaba una o más islas. Puesto que todas esas sociedades de la Polinesia carecían de escritura, Kirch se apoya en datos lingüísticos, arqueológicos y etnográficos; advierte que las semejanzas culturales entre sociedades puede surgir de la retención del mismo patrón ancestral (homologías compartidas), desarrollo independiente (analogías) o préstamos. Las condiciones iniciales eran las islas con diferentes entornos físicos; la perturbación, el asentamiento de los polinesios (más la dispar duración del asentamiento) y el resultado examinado, la complejidad sociopolítica y económica.

Por dar otro ejemplo, James Belich se detiene en la comparación de siete sociedades del siglo XIX: las de Estados Unidos, las "Provincias Británicas Occidentales" (Canadá, Australia, Nueva Zelanda y Africa del Sur), Argentina y Siberia. Esas sociedades diferían entre sí en múltiples aspectos (proporción de inmigrantes que volvían a la madre patria); diferían también en su década de máximo esplendor y, por tanto, en el estadio prevaleciente de la Revolución Industrial. Cinco de esas sociedades eran anglófonas, una (Argentina) hispanohablante, aunque recibió más inmigrantes italianos que españoles, y otra (Siberia) era rusa. Pese a tan dispares condiciones "experimentales", las fronteras repetían un mismo patrón cíclico similar de tres etapas: un incremento demográfico explosivo marcado por importación neta de bienes y capital; pulsos de episodios de tasas de desarrollo ruinosas y bancarrota de empresas y haciendas, y, por fin, un rescate de las exportaciones con la creación de una nueva economía basada en la exportación a la metrópoli. Las condiciones iniciales eran los distintos países no templados de Europa; la perturbación, un asentamiento de frontera explosivo; el resultado examinado, los ciclos de explosión, estancamiento y rescate de las exportaciones.

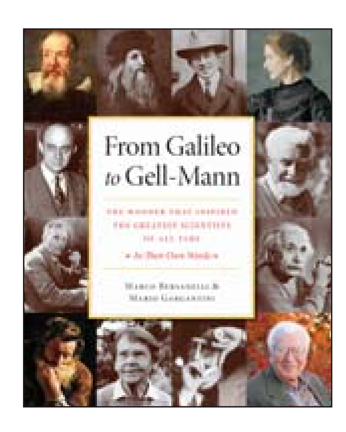
La obra prosigue con nuevos casos estudiados. Por distintos motivos despierta vivo interés el investigado por Jared Diamond, sobre el contraste entre Haití y la República Dominicana, que se reparten la antigua isla de la Española. Vista desde el aire, la Española aparece biseccionada: a occidente, la zona parda, deforestada de Haití y fuertemente erosionada. A oriente, el verde de la República Dominicana, con casi un tercio de su extensión cubierto todavía de árboles. Haití, densamente poblada, ocupa el furgón de cola del Nuevo Mundo; la República Dominicana, aunque país en vías de desarrollo, tiene una renta media per cápita seis veces la de Haití, numerosas empresas de exportación y una sucesión reciente de gobiernos democráticos. Tales diferencias obedecen en mínima parte a las condiciones iniciales del entorno. El grueso de la explicación se esconde en su respectiva historia colonial: la Española occidental fue colonizada por Francia, la Española oriental por España. Esa diferencia inicial en el poder colonial produjo importantes disparidades en las plantaciones de esclavos, lenguaje, densidad de población, desigualdad social, riqueza colonial y deforestación, conduciendo primero a las diferencias en la lucha por la independencia; luego a las diferencias en la percepción por los europeos y americanos; más recientemente, la diferencia en la duración de los dictadores, y, por último, las diferentes

condiciones de uno y otro país hoy. Las condiciones iniciales eran las de la geografía física de las dos mitades de la misma isla; la perturbación fue la colonización francesa frente a la colonización española; el resultado examinado fue la riqueza, la economía de exportación, cubierta arbórea y erosión.

Una preocupación ubicua en los experimentos naturales es la de si los resultados dispares observados se debían realmente a los tipos particulares de diferencias en la perturbación o en las condiciones iniciales advertidos por el "experimentador" o si respondían a otras divergencias. Ese peligro de interpretación errónea se tiene siempre presente en los experimentos de laboratorio. Un famoso ejemplo fue el descubrimiento del efecto Josephson en física: las mediciones de laboratorio de la superconductividad produjeron en un comienzo resultados confusos, hasta que Brian Josephson se percató de que una variable independiente crítica eran las sutiles diferencias de temperatura, a las cuales la superconductividad se mostraba mucho más sensible de lo que se había advertido.

Además, hay que salir al paso del problema de la causalidad inversa: si A y B guardan correlación, puede suceder que A no cause B, sino al revés. A menudo podemos resolver el dilema con la simple resolución de qué cambió antes, si A o B. La causalidad de Granger es la técnica estadística que se aplica para descubrir la dirección de causa a efecto. Se ha de considerar también el sesgo oculto: la variable perturbadora identificada por el experimento podría en realidad formar parte de una concatenación de cambios, en cuyo seno otra variable distinta de la identificada por el experimentador podría ser la causante real de la disparidad de los de los resultados. Y aun cuando se haya obtenido la prueba convincente de que A causa B, se requieren pruebas ulteriores para establecer los mecanismos a través de los cuales A causa B.

Luis Alonso



FROM GALILEO TO GELL-MANN. THE WONDER THAT INSPIRED THE GREATEST SCIENTISTS OF ALL TIME, IN THEIR OWN WORDS,

por Marco Bersanelli y Mario Gargantini. Templeton Press; West Conshohocken, 2009.

Asombro científico

La aventura del saber

Este libro, traducción del original italiano *Solo lo stupore conosce* (2003), presenta lo más esencial de las motivaciones y procedimientos cognitivos de los científicos, enfrentados a la sorpresa del mundo y el reto de comprenderlo. La idea de tal presentación es considerablemente original, y su originalidad aumenta por el hecho de que tales motivaciones son expresadas con las propias palabras de los científicos, mediante una amplia colección de textos de personajes de primera fila: Galileo, Kepler, Newton, Pascal, Gauss, Mendel, Darwin, Schrödinger, Heisenberg, Hoyle, Monod, Hawking, Gell-Mann, entre muchos otros.

Los siete capítulos del libro toman su título de los siete aspectos que estructuran la obra: asombro, observación, experimento, descubrimiento, certeza, signo y propósito. El primer capítulo arranca con la sorpresa primigenia, base de toda pregunta profunda y de toda curiosidad perseverante; los cuatro siguientes se refieren a aspectos metodológicos de la ciencia, y los dos últimos entran en la metafísica, dentro de una órbita religiosa cristiana.

La obra, pues, no es un libro de historia de la ciencia, ni de filosofía de la ciencia, ni de psicología de la investigación, ni un conjunto de biografías o de anécdotas, ni un tratado de ciencia y religión, aunque participa en algo de todas esas líneas. Su propósito es filosófico y humano: indagar en los motivos, las satisfacciones, las dificultades y las recompensas cognoscitivas del proceso científico, mediante una antología bien justificada y estructurada de confesiones personales o, en algunos casos, en fragmentos narrativos dedicados directamente a los personajes en cuestión.

Los autores de esta iniciativa son Marco Bersanelli, profesor de astrofísica de la Universidad de Milán, miembro del equipo de la misión espacial Planck para estudiar el universo primitivo, y presidente de EURESIS, una asociación científica y cultural que promueve diálogos interdisciplinarios en temas de frontera de la ciencia; y Mario Gargantini, ingeniero electrónico, periodista científico, director de *Emmeciquadro*, una revista sobre enseñanza de la ciencia, y autor de diversos ensayos sobre historia de la ciencia, ciencia y religión y educación científica.

Cada capítulo desmenuza su tema en una diversidad de líneas que lo enriquecen poliédricamente. Por ejemplo, el primer capítulo, dedicado al asombro, trata de las relaciones entre asombro y realidad, belleza, contemplación, curiosidad, conocimiento, satisfacción y observación. El último aspecto enlaza con el tema al que está dedicado el capítulo siguiente; en este caso la observación, que es el tema del segundo capítulo, subdividido a su vez en las relaciones entre observación y afecto, preconcepto, realismo, pregunta y experimento. Este sistema da al libro una flexibilidad y una riqueza muy elevadas, y permite hacer brillar cada tema desde una indagación multifacética.

El método científico, sus límites, sus circunstancias, su humanidad, son explorados de forma amena. La intuición, la demostración, la innovación, el azar de los descubrimientos, la perseverancia, el trabajo en equipo, la responsabilidad, la ética, son algunos de los aspectos abordados, que concluyen con consideraciones sobre el sentido y el misterio de la existencia. Este libro constituye, pues, una reflexión a la vez analítica y apasionada de lo que es la ciencia en toda su amplitud, en la aventura humana del conocimiento.

David Jou

EN EL PROXIMO NUMERO DE OCTUBRE 2010



Exoplanetas habitables,

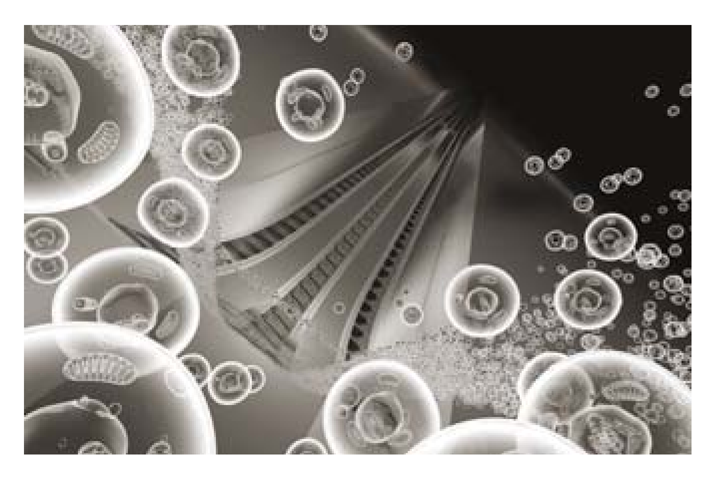
por Dimitar D. Sasselov y Diana Valencia

Numerosos planetas extrasolares podrían reunir las condiciones apropiadas para albergar vida.

Filmaciones del nanomundo,

por Ahmed H. Zewail

Una nueva técnica permite observar objetos nanoscópicos en movimiento.



Píldoras robot,

por Paolo Dario y Arianna Menciassi

Los viajes por el interior del cuerpo humano no son ya mera fantasía. Dentro de poco, diminutos dispositivos podrán operar, administrar fármacos o facilitar los diagnósticos.

Ordenadores vulnerables,

por John Villasenor

Los componentes electrónicos pueden sufrir el ataque de piratas informáticos antes de salir de fábrica.

Cuando el mar salvó la humanidad,

por Curtis W. Marean

Las duras condiciones climáticas habrían causado la extinción de nuestra especie si ésta no hubiera hallado cobijo en la costa meridional de Africa.

